

Comparaison des paramètres physiques de la surface du sol au printemps en fonction des techniques culturales

Association pour la Relance Agronomique en Alsace

Maître de stage : M. Paul van DIJK
Tutrice : Mme Isabelle SOUSTRE-GACOUGNOLLE

Sandie Masson



Juin 2011



Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier M. Rémi Koller et M. Paul van Dijk pour m'avoir fait confiance en m'intégrant au sein de l'équipe de l'Association pour la Relance Agronomique en Alsace.

Un grand merci à Paul van Dijk qui m'a encadrée durant toute la durée de ce stage et m'a aidé dans la compréhension de ses objectifs. C'est également lui qui m'a montré les différentes techniques de mesures, m'a conseillé dans la mise en forme de mes résultats et tout au long de leur interprétation. Merci pour votre patience, vos explications et vos conseils avisés !

Merci à Martine Trautmann, qui m'a montré et m'a laissé expérimenter les différentes techniques d'analyse du sol au laboratoire d'analyse des sols et des formations superficielles à Strasbourg. Merci pour votre bonne humeur, votre passion du métier et votre esprit pédagogue.

Merci à Véronique Auzet, professeure à l'université de géographie de Strasbourg qui a participé à ma première journée « terrain » et m'a guidé dans l'étude des états de surface grâce à sa grande expérience.

Merci à Lucile Winterer, ma co-stagiaire à l'ARAA, sans qui les journées sur le terrain m'auraient paru très longues...Merci également aux stagiaires et doctorant à l'ARAA et à l'INRA qui ont partagé ces quelques semaines de stage avec moi : Marie-Luce, Chloé, Pierre-Alain, Julie et Charles.

Merci à toute l'équipe INRA.

GLOSSAIRE

Assolement : Répartition dans l'espace de cultures différentes. Afin de freiner le ruissellement, il est conseillé d'intercaler cultures de printemps et cultures d'hiver le long des chemins d'eau.

Battance : Dégradation de la structure de la surface du sol sous l'action des pluies se traduisant par la formation d'une croûte superficielle.

CIPAN : Culture intermédiaire piège à nitrates.

Coulées d'eau boueuse : Une coulée d'eau boueuse est un écoulement d'eau fortement chargée en terre. Elle résulte du ruissellement des eaux pluviales sur des surfaces érodibles.

Couvert végétal : Dans le cas de plantes sarclées (ex : le maïs), le semis direct peut être accompagné d'un couvert d'interrang. Il peut dans certains cas être permanent, le couvert est alors tondu ou sa croissance est ralentie par une légère application de glyphosate avant le semis de la culture. Pendant la croissance de la plante principale, le couvert végète et se développe lorsque la culture est récoltée. D'un point de vue général, les couverts ont pour effet de lutter contre la battance, le ruissellement et l'érosion.

Culture d'hiver : Culture semée en automne.

Culture de printemps : Culture semée au printemps.

Croûte structurale : Croûte se formant à la surface du sol sous l'action des pluies par effet « splash ».

Croûte sédimentaire : Croûte se formant à la surface du sol sous l'action des pluies, suite à un flaquage et une sédimentation.

Erosion hydrique : Détachement et transport des particules de terre en conséquence du ruissellement lorsque l'eau de pluie ne s'infiltré plus dans le sol.

Erodibilité : Sensibilité d'un sol à l'arrachement et transport des particules ou des micro-agrégats par les gouttes de pluies et par l'eau du ruissellement.

Fertilité des sols : La fertilité d'un sol se définit par trois caractéristiques, sa disponibilité en éléments nutritifs, sa capacité à fournir des éléments nutritifs à partir de ses propres réserves, sa capacité à utiliser et stocker les apports nutritifs extérieurs.

Infiltration : Phénomène du passage de l'eau (ou d'un autre fluide) à travers la surface du sol, de sa pénétration dans le sol et de son mouvement descendant dans la zone non saturée du sous-sol.

Infiltrabilité : Tranche d'eau maximale qui peut s'infiltrer par unité de temps dans le sol et dans des conditions données.

Itinéraire technique : Combinaison logique et ordonnée d'opérations culturales mises en œuvre pour la conduite d'une culture.

Labour (Castillon et Germon, 2007) : Les itinéraires avec labour englobent l'ensemble des techniques qui induisent un travail profond du sol par mélange et retournement des horizons à l'aide d'une charrue à versoir. Ce retournement permet l'enfouissement des résidus de culture et de réduire l'expansion des ravageurs, adventices et pathogènes. Enfin il permet l'ameublissement du sol.

Rugosité (ou microrelief du sol) : Répartition spatiale des altitudes de la surface du sol. On distingue la rugosité orientée, liée par exemple aux motifs agraires (traces de roue, buttes, ...) et la rugosité aléatoire liée à la répartition des agrégats sur une surface plane.

Ruissellement : Ecoulement d'eau sur la surface du sol.

Structure du sol : Mode d'organisation spatiale des différentes particules de sol ainsi que la nature et l'intensité des liaisons qui existent entre elles.

Techniques culturales sans labour (TCSL) (Castillon et Germon, 2007) : Les techniques culturales sans labour (TCSL) correspondent à l'ensemble des itinéraires techniques de travail du sol sans retournement. Elles comprennent des techniques très différentes, du pseudo-labour au semis direct.

Travail profond sans labour (TPSL) : Un sous-ensemble des techniques culturales sans labour employant des passages d'outils à profondeur importante, entre 15 et 40 cm (ex : chisel, décompacteur...) suivi d'un travail superficiel pour préparer le lit de semence. Dans le rapport, ce type de techniques sera nommé « non labour ».

Semis direct (SD) (Castillon et Germon, 2007 : Le semis direct correspond à un travail du sol localisé sur la ligne de semis et sans travail profond (2-3 cm à 10 cm de profondeur au maximum). Il demande un équipement particulier de semoirs équipés de disques.

SOMMAIRE

Remerciements

Glossaire

INTRODUCTION.....	1
PROBLEMATIQUE	1
OBJECTIFS DU STAGE	3
1. PRESENTATION GENERALE DU STAGE	4
1.1. PRESENTATION DE L'ARAA.....	4
1.2. LES SITES DE MESURES ET LES ACTIVITES REALISEES.....	4
1.3. LES METHODES DE MESURES UTILISEES	6
1.3.1. <i>Les états de surface</i>	6
1.3.2. <i>La rugosité</i>	6
1.3.3. <i>La résistance à l'arrachement par l'eau des particules de terre</i>	7
1.3.4. <i>La perméabilité des couches proches de la surface</i>	7
1.3.5. <i>La stabilité structurale</i>	8
2. LES INCIDENCES DES TECHNIQUES DE TRAVAIL DU SOL, DE L'ASSOLEMENT ET DU	
TYPE DE SOL SUR LA STRUCTURE DU SOL.....	9
2.1. L'INFLUENCE DU TRAVAIL DU SOL.....	9
2.1.1. <i>Obernai, culture de blé : Labour/ Non labour/ Semis direct</i>	9
2.1.2. <i>Geispitzen, maïs : Labour/ Non labour</i>	11
2.1.3. <i>Rouffach, maïs : Labour/ Non labour</i>	12
2.1.4. <i>Muntzenheim, maïs : Labour/ Semis direct</i>	13
2.1.5. <i>Conclusions et discussions</i>	13
2.2. L'INFLUENCE DU TYPE DE CULTURE	14
2.2.1. <i>Rouffach : Blé/ Maïs</i>	14
2.2.2. <i>Muntzenheim : Orge/ Maïs</i>	15
2.2.3. <i>Conclusions</i>	16
2.3. L'INTENSITE DE L'EROSION SELON LES TYPES DE SOL.....	16
2.4. LA PERMEABILITE DES COUCHES PROCHES DE LA SURFACE : EXEMPLE DU SITE DE GEISPITZEN	17
3. EXEMPLE D'APPLICATION : LE MODELE LISEM	17
CONCLUSION	19

Références bibliographiques

INTRODUCTION

Problématique

Le sol est défini comme la couche superficielle de la croûte terrestre. Il est constitué de matière minérale et organique, d'eau, d'air et d'êtres vivants. Il est la base de toute activité agricole puisqu'il fournit l'alimentation et le support nécessaires aux productions végétales et animales. D'un point de vue environnemental, il a un rôle de filtre des produits polluants qu'il stocke et élimine pour certains évitant ainsi qu'ils ne se retrouvent dans l'eau. D'autre part, c'est un réservoir de biodiversité. Plusieurs processus de dégradation menacent le sol et peuvent diminuer ces performances fonctionnelles (Soil Thematic Strategy, 2006). Parmi ces processus c'est l'érosion hydrique qui menace les sols dans certains secteurs en Alsace de façon préoccupante.

Les conditions climatiques, la topographie, la nature des sols et l'occupation des sols conditionnent cette érosion. Elle comporte trois mécanismes (AUZET, 1987) : un mécanisme d'arrachement des particules de terre, un mécanisme de transport de ces particules et un mécanisme de dépôt lorsque la capacité de transport diminue. La pluie peut induire un phénomène d'arrachement des particules du sol de différentes manières : par désagrégation mécanique sous l'impact des gouttes de pluie, par éclatement dû à la compression lors de l'humectation de l'air contenu dans les pores, par microfissuration due à un gonflement différentiel, par dispersion physico-chimique (Le Bissonnais et Le souder, 1995). Elle induit également du ruissellement, un écoulement de l'eau à la surface du sol qui peut être « Hortonien » lorsque l'intensité de la pluie est supérieure à la capacité d'infiltration du sol ou dû à la saturation du sol (Ambroise, 1999). La vitesse et le débit de ce ruissellement dépendent de la vigueur de la pente et sa forme. La nature des sols, et notamment leur stabilité structurale mais également l'occupation du sol, la nature des cultures et les pratiques culturales conditionnent la résistance à l'arrachement et l'infiltration.

L'érosion des sols agricoles est un réel problème en Alsace. D'après la cartographie effectuée par l'Association pour la Relance Agronomique en Alsace (ARAA) en 2007, environ 15 % de la surface totale de la région est concernée par une sensibilité à l'érosion moyenne à très élevée. Ces surfaces à risque sont principalement les terres arables des collines limoneuses du Sundgau, du Kochersberg et de l'Outre-forêt, ainsi que les parcelles viticoles en forte pente du piémont. Cette érosion entraîne des risques d'inondations et de coulées

d'eau boueuse provoquant des dommages aux infrastructures et aux habitations. Une diminution du potentiel de rendement des terres agricoles due à la perte de matières organique et minérale voire une ablation totale du sol peut également survenir. Une accumulation de dépôts qui recouvrent et détruisent une partie des jeunes plants est aussi possible. Enfin, les particules et les substances transportées dans les rivières induisent la pollution et la dégradation des milieux aquatiques. Pour limiter les dommages en aval plusieurs solutions curatives sont employées telles que les bassins de rétention et les barrages juste avant les villages ou, plus en amont, l'utilisation de fascines vivantes ou mortes et de bandes enherbées. Ces solutions curatives ne règlent pas le problème d'érosion des terres agricoles, c'est pourquoi des mesures préventives sont recherchées au niveau du travail du sol, de l'assolement et de l'enrichissement en matière organique des sols à risque.

Les chambres d'agriculture d'Alsace se sont fortement impliquées dans la lutte contre l'érosion. En concertation avec les agriculteurs des bassins versants prioritaires, elles conçoivent des programmes d'action qui marient plusieurs types de mesures tels que les assolements concertés et l'utilisation des techniques culturales sans labour (TCSL). Elles font appel à l'ARAA pour quantifier, par modélisation spatialisée, la diminution de l'érosion et des coulées d'eaux boueuses. Cette modélisation aide à juger la pertinence de leurs propositions aux agriculteurs et permet de les optimiser si besoin. D'autre part, la modélisation donne des supports intéressants pour animer les réunions de travail et rendre conscient les différents participants de l'importance du problème d'érosion et des risques résiduels encore présents après une action anti-érosion sur les terres agricoles.

LISEM (Limbourg Soil Erosion Model ; De Roo et al., 1996)., le modèle utilisé par l'ARAA, est un modèle à base physique. Il fonctionne grâce à un certain nombre de paramètres liés à l'infiltrabilité et l'érodibilité du sol, ainsi qu'aux caractéristiques hydrauliques de la surface du sol. A ce jour, les situations les plus à risque en Alsace (notamment les cultures de printemps sur sols limoneux) sont facilement modélisables car des études à leur sujet ont permis de paramétrer le modèle LISEM. En ce qui concerne le paramétrage des TCSL, le site de mesure de Geispitzen dans le Haut-Rhin et les travaux récents de l'Université de Strasbourg dans le cadre des thèses d'Ali (2008) et d'Armand (2010) ont permis d'acquérir un référentiel de plus en plus riche pour les situations de travail profond sans labour (TPSL) mais peu de données existent sur le semis direct. D'autre part, ces travaux ne s'intéressent pas à tous les paramètres nécessaires à l'utilisation du modèle LISEM

et privilégient l'étude de la culture de maïs sur sols limoneux. Or, les événements de coulées d'eaux boueuses des dernières années ont montré que le risque n'était pas restreint à des sols limoneux à faible teneur en argile. C'est pourquoi il est nécessaire d'obtenir des paramètres pour une gamme plus large de sols.

Objectifs du stage

Pour améliorer les modélisations des programmes de mesures, l'ARAA a besoin de connaître :

- a) Les paramètres de LISEM pour les cultures d'hiver souvent utilisées dans les assolements concertés proposés par les chambres d'agriculture.
- b) Les paramètres de LISEM des différents TCSL (notamment TPSL et semis direct), incluant la stabilité des agrégats, paramètre très important pour le modèle et dont le référentiel régional est quasi-absent.

Il s'agit de fournir, à l'aide de méthodes simples, rapides et efficaces de mesures sur le terrain, des paramètres de LISEM liés aux états de surface (EDS) et à l'érodibilité. Ils sont mesurés à partir des essais alsaciens comparant différents modes de travail du sol et ayant des types de sols différents. Le stage est effectué en collaboration avec Lucile Winterer, une stagiaire de M2, qui s'intéresse aux paramètres d'infiltrabilité du modèle LISEM sur les mêmes sites. Les résultats de mesures des EDS seront utilisés par l'ARAA pour mieux comprendre l'infiltrabilité mesurée par Lucile Winterer.

Ce rapport sera d'abord consacré à la présentation de la structure qui m'a accueillie pendant ces neuf semaines de stage, l'ARAA ainsi qu'aux activités que j'ai réalisées et aux méthodes utilisées. Dans un second temps les résultats obtenus sont analysés, interprétés et discutés. En dernier lieu, une application du paramétrage dans le modèle LISEM est proposée.

1. Présentation générale du stage

1.1. Présentation de l'ARAA

Absent des autres régions de France, l'ARAA a été créé en 1984 dans le but de développer l'agriculture en Alsace. Elle travaille en collaboration avec les chambres d'agriculture du Haut Rhin et du Bas Rhin et avec l'INRA.

Constitué d'une équipe de huit personnes, l'ARAA travaille sur deux programmes :

- un programme agronomique régional d'appui au conseil agricole
- un programme recherche et développement avec l'INRA.

Ainsi, en testant des nouvelles techniques et systèmes de culture tels que les TCSL et les couverts végétaux en interculture, cette association construit une agriculture répondant aux préoccupations environnementales et sanitaires :

- Pollution des eaux par les nitrates et produits phytosanitaires
- Erosion des sols et coulées d'eau boueuse
- Qualité des récoltes.

Quatre grandes missions lui sont confiées :

- Cartographie des sols alsaciens
- Elaboration de références techniques
- Etude de l'impact des pratiques agricoles sur le territoire alsacien
- Développement de la coopération transfrontalière

Les travaux de cette association sont financés par la Région Alsace, l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, la Chambre Régionale d'Agriculture d'Alsace.

Mon travail s'inscrit dans la mission d'évaluation de l'impact des pratiques agricoles sur le sol, à l'échelle des parcelles agricoles. Je travaille sous la responsabilité de M. Paul Van Dijk, docteur en géographie physique à travers la thématique « ruissellement et érosion des sols en Alsace ».

1.2. Les sites de mesures et les activités réalisées

Quatre sites et douze modalités différentes ont été étudiés. Trois de ces sites ne sont pas en pente, ce choix est partiellement lié aux mesures d'infiltrométrie dans le cadre du stage de Lucile Winterer. Ces mesures sont difficiles à conduire sur des pentes. Les dates de la mise en place de l'essai sont indiquées entre parenthèses.

1. Geispitzen (2002) : Parcelles en pente sur sol limoneux (LL). La culture étudiée est le maïs en technique labour et en travail profond sans labour (TPSL)
2. Obernai (2004) : Parcelles sur terrain plat, sol limoneux sableux argileux (LSA). La culture étudiée est le blé après une culture de maïs, en labour, non labour et semis direct.
3. Muntzenheim (2010) : Parcelle à plat, Ried brun, sol sableux argileux caillouteux (SA). Quatre situations sont étudiées :
 - Maïs référent en labour
 - Maïs en semis direct sous couvert permanent (trèfle)
 - Orge d'hiver en labour
 - Maïs en semis direct sur mulch de pois.
4. Rouffach (2009) : Parcelle à plat sur sol argilo limoneux et limoneux argileux (LA). Culture de maïs référente, maïs en TPSL après CIPAN, blé en TPSL après CIPAN.

La première facette de ce stage a été l'étude des états de surface et des paramètres d'érodibilité de chaque parcelle. Une première campagne de mesures a été réalisée au cours du mois d'avril après le semis du maïs et une seconde campagne aura lieu début juin. Entre ces deux dates, la pluie modifie les états de surface. Sur un site donné, les vitesses de dégradation des sols des différentes modalités peuvent ainsi être comparées entre elles. Pour chaque modalité deux échantillons de terre ont été collectés : le premier pour une analyse granulométrique et le second dans le but d'étudier la stabilité des agrégats du sol. Les analyses des échantillons ont été effectuées au Laboratoire d'Analyses des Sols et des Formations Superficielles de l'Université de Strasbourg avec l'aide de Mme Martine Trautmann.

La seconde facette du stage a été de tester l'utilité et la faisabilité de la méthode « inverse borehole » pour déterminer la perméabilité des couches du sol proche de la surface.

Le travail de terrain a duré environ cinq semaines et quatre semaines ont été consacrées à l'analyse et l'interprétation des résultats.



Photo 1.1 Chaînette à billes

1.3. Les méthodes de mesures utilisées

1.3.1. Les états de surface

Toutes les mesures prises sur le terrain sont notées sur des fiches (annexe 1). Afin d'appréhender les états de surface des parcelles, plusieurs critères sont évalués :

- La rugosité de la surface du sol : couverture en mottes, rugosité visuelle, rugosité pour l'eau (ou seuil à franchir pour le ruissellement)
- La battance : faciès, couverture en croûtes structurale et sédimentaire
- La macroporosité : présence de fentes, de trous de vers de terre
- La couverture végétale : culture, résidus de culture, adventices
- Les traces d'écoulement : incisions

1.3.2. La rugosité

Il existe différentes méthodes pour mesurer la rugosité du sol. J'ai utilisé la méthode la « chaînette » (Roose, 1994 ; Gilley et Kottwitz, 1995): une chaînette à billes (photo 1.1) est posée au sol et s'adapte aux différents niveaux de hauteur des agrégats terreux. Cette méthode simple est une alternative à l'utilisation de rugosimètre, méthode bien plus laborieuse à mettre en œuvre et à analyser.

J'ai réalisé à chaque fois huit mesures de chaînette dans l'interrang, dans le rang et perpendiculairement au travail du sol. Ce dernier type de mesure prend en compte la rugosité des agrégats mais également celle due aux différences de dénivelé au niveau des traces de roue de semoir, de pulvérisateur et de la ligne de semis. En comparant la longueur de la chaînette ainsi obtenue à sa longueur initiale, il est possible d'en déduire plusieurs coefficients de rugosité aléatoire et orientée (Gilley et Kottwitz, 1995).

CRR est le coefficient de rugosité aléatoire (la rugosité liée aux agrégats terreux), dans le sens du travail du sol. Afin d'obtenir les résultats proposés dans la partie suivante, j'ai calculé ce coefficient dans l'interrang et dans le rang. J'ai ensuite réalisé une moyenne pondérée qui tient compte du fait que le rang représente 1/3 de la surface et que l'interrang en représente 2/3 en culture de maïs. Dans le blé et l'orge, j'ai mesuré seulement dans l'interrang et je n'ai donc pas effectué de moyenne pondérée.

Soit : $CRR = 100*(1-(L2/L1))$ avec L1, la longueur initiale de la chaîne ; L2, la longueur mesurée lorsque la chaîne est sur le sol. CRR est calculé séparément pour le rang (= CRRr) et pour l'interrang (CRRin). Le CRR global de la surface est calculé comme suit :



Photo 1.2 Scissomètre

$$\text{CRR pondéré} = (\text{CRRin} * 2 + \text{CRRr} * 1) / 3$$

CPR est le coefficient de rugosité dans le sens perpendiculaire au travail du sol, il inclut la rugosité liée aux agrégats (aléatoire) et celle liée aux crêtes et sillons du sol travaillé (orientée). Il est calculé à partir de la même formule que CRR.

COR est le coefficient de rugosité orientée, il se calcule de la manière suivante :

$\text{COR} = \text{CPR} - \text{CRR}$ en partant de l'hypothèse que la rugosité orientée est plus importante que la rugosité aléatoire (Merill et Huang, 1999).

Le paramètre de rugosité utilisé dans LISEM est le « random roughness factor » RRF (Almarrass, 1966). Selon (Gilley et Kottwitz, 1995) il peut être estimé à partir de CRR et la pluie cumulée tombée sur une culture depuis le dernier travail du sol :

$$\text{RRF} = A * (\text{CRR}^B)$$

$$A = 1 - (\exp(-0.00482 * (P + 19)))$$

$$B = 1 / (1 - (\exp(-0.00295 * (P + 321)))) \text{ avec } P \text{ la pluie cumulée.}$$

1.3.3. La résistance à l'arrachement par l'eau des particules de terre

Cette mesure est obtenue grâce à un scissomètre (ou torvane). Le principe est d'enfoncer délicatement le scissomètre (photo 1.2) de façon perpendiculaire dans la terre préalablement humidifiée sur une surface la plus plate possible. Il est important de ne pas tasser la terre lors de l'enfoncement. Il faut ensuite tourner délicatement le cadran au sommet. Au départ, une résistance empêche le cadran de tourner correctement (c'est la résistance de la terre) puis il y a un relâchement. Il faut alors arrêter de tourner le cadran et noter la position de l'aiguille.

J'ai effectuée dix fois cette mesure dans le rang, dans l'interrang et dans les traces de roue (semoir et/ ou pulvérisateur). La valeur est directement exploitable.

1.3.4. La perméabilité des couches proches de la surface

Sur certaines parcelles, j'ai également utilisé la méthode Inverse Borehole qui permet d'étudier la perméabilité des couches du sol proches de la surface (Cammeraat et van Beek, 2001). Le principe est de réaliser un trou de 50cm dans le sol à l'aide d'une tarière. Le trou est ensuite saturé en eau trois fois dans un intervalle de temps de 30 min. Enfin, la hauteur entre la surface du sol et la surface de l'eau qui s'infiltré en fonction du temps est mesurée.

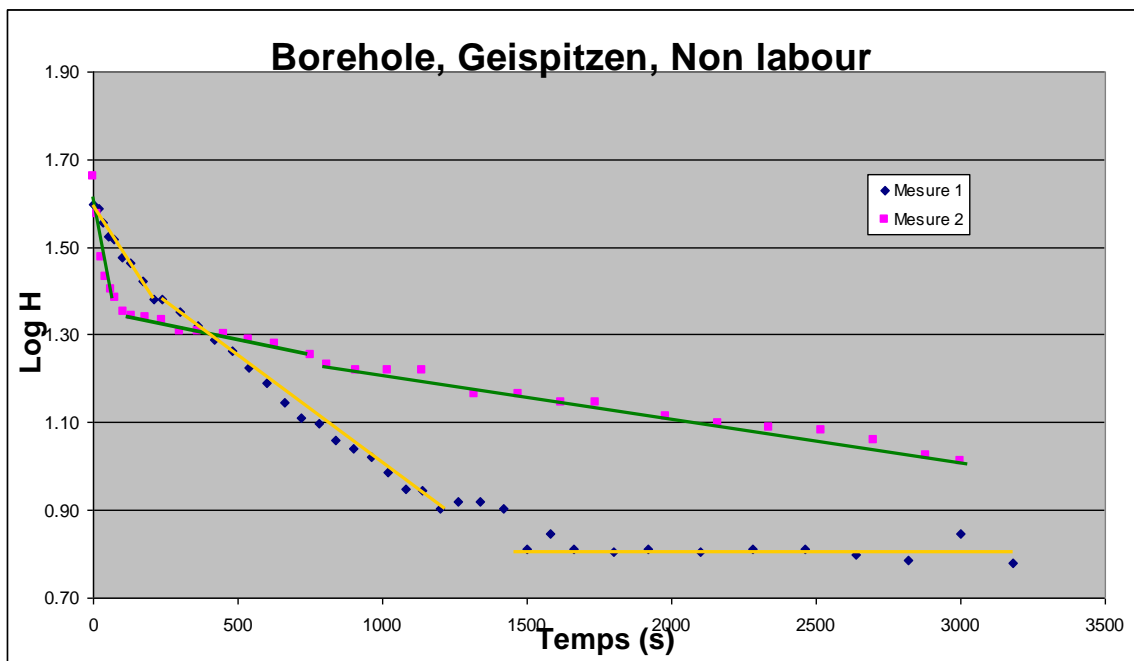


Figure 1.1 Détermination des couches aux perméabilités différentes

Cette méthode rapide et facile à mettre en œuvre est une alternative aux prises d'échantillons à plusieurs profondeurs pour une détermination de la conductivité de saturation (k_s) au laboratoire par couche distinguée. Cependant, la méthode Inverse Borehole présente quelques inconvénients, elle est assez destructive puisque l'action de la tarière peut dans certains cas lisser le sol sur la face interne du trou (en fonction de l'humidité et du taux d'argile) et réduire l'infiltration. D'autre part la méthode mesure plutôt la perméabilité horizontale que verticale.

Afin de convertir les résultats en données interprétables, le logarithme de la hauteur d'eau (l'opposé de la profondeur mesurée) est calculé. Le graphique présentant ce logarithme en fonction du temps en secondes est ensuite tracé. A partir de ce graphique (figure 1.1), on identifie les différentes couches dans le sol en étudiant les différences de pente.

On repère à chaque fois les temps initiaux et finaux de chaque couche ainsi que les hauteurs initiales et finales qui sont utiles pour calculer les coefficients de perméabilité de la manière suivante :

$K_{s0} = (1,15 * r * (\log(h_i + (r/2)) - \log(h_f + (r/2)))) / (t_f - t_i)$, avec K_{s0} le coefficient de perméabilité de la première couche (la plus profonde), r le rayon du trou à la tarière, h_i la hauteur initiale de la couche (la plus profonde), h_f la hauteur finale. La même formule est appliquée pour calculer K_s tot, la perméabilité de toutes les couches.

Pour les couches suivantes, la formule suivante est utilisée :

$$K_{si} = ((K_{sat} * \sum_{[0>i]} Z_i) - (\sum_{[0>i-1]} K_{si} * Z_i)) / Z_i$$

1.3.5. La stabilité structurale

La stabilité structurale du sol est un bon indicateur de sa sensibilité à la battance. Elle est mesurée par le biais de la méthode AFNOR NF X31-515 (2005) établie par M. Le Bissonais. Après tamisage à 5 mm puis à 3 mm, les particules de terre comprises entre 3 et 5 mm sont récupérées et divisées en trois lots dont chacun subit un des trois traitements suivants :

- Humectation rapide par immersion
- Humectation lente par capillarité
- Désagrégation mécanique par agitation après humectation

Les trois lots subissent ensuite cinq mouvements hélicoïdaux au tamis de 50 μ m immergé dans l'éthanol afin d'effectuer une première séparation granulométrique. La fraction $> 50 \mu$ m est récupérée puis chauffée durant 48h à 105 °C. Enfin, après six tamisages successifs à 2000 μ m, 1000 μ m, 500 μ m, 200 μ m, 100 μ m, 50 μ m, il est possible de calculer le

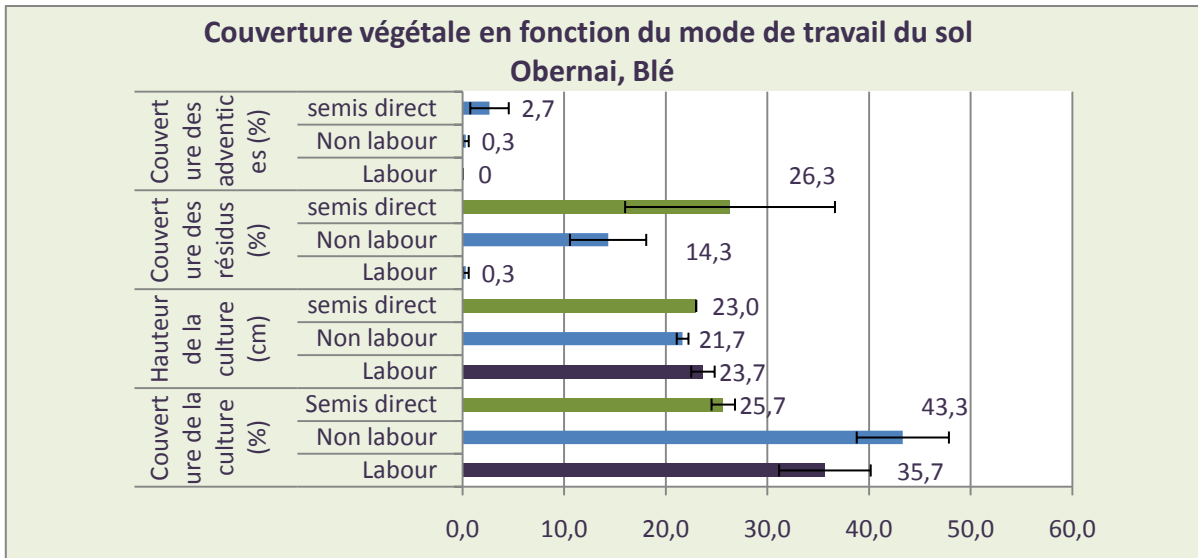


Figure 2.1 Couverture végétale en fonction du travail du sol, Obernai, blé.

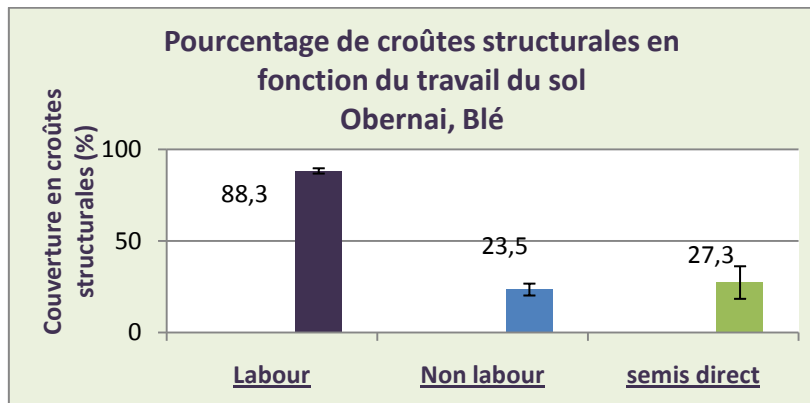


Figure 2.2 Couverture en croûtes structurales selon le travail du sol, Obernai, blé.

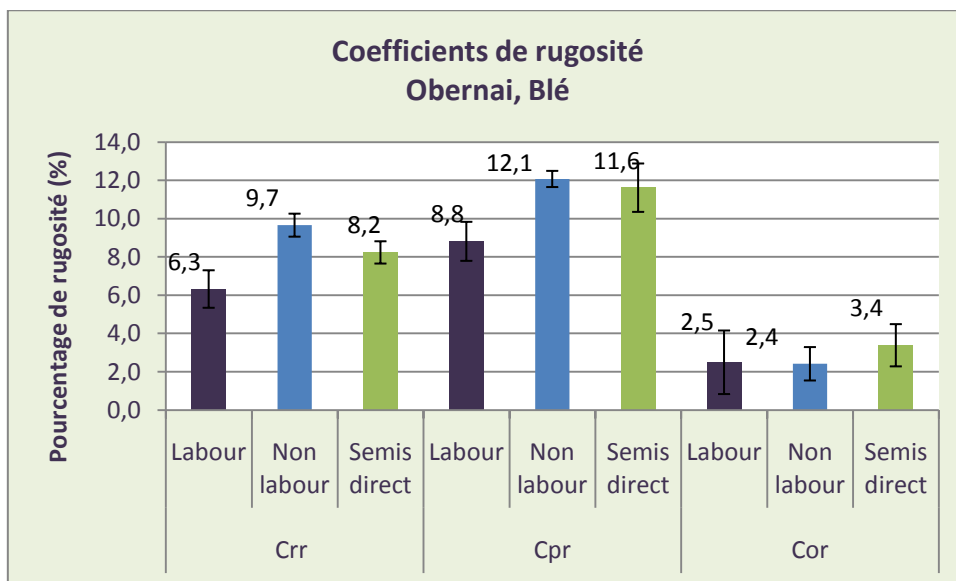


Figure 2.3 Rugosité selon travail du sol, Obernai, blé

diamètre moyen pondéral après désagrégation (MWD). Une valeur élevée de MWD correspond à un sol peu sensible à la battance et à l'érosion hydrique.

Les résultats sont présentés dans l'annexe 8.

2. Les incidences des techniques de travail du sol, de l'assolement et du type de sol sur la structure du sol

Toutes les figures n'ont pu être présentées dans le rapport, seules les plus illustratives sont disposées en vis-à-vis. Pour toutes informations complémentaires, les tableaux complets sont donnés en annexes.

2.1. L'influence du travail du sol

2.1.1. Obernai, culture de blé : Labour/ Non labour/ Semis direct

A Obernai, le travail du sol en non labour et en semis direct est mis en place depuis 2001. Les analyses au laboratoire montrent un effet positif des TCSL sur la stabilité des agrégats par rapport au labour (annexe 8).

La couverture végétale (figure 2.1) est plus importante en non labour qu'en labour, qu'en semis direct. Ce n'est pas nécessairement synonyme de baisse de rendement puisqu'un rééquilibre peu s'effectuer au cours des mois de culture. D'autre part la hauteur des pousses est similaire quel que soit le mode de travail du sol.

En ce qui concerne les résidus, ils sont évidemment plus nombreux dans le cas d'un travail en semis direct que dans le cas de travail en non labour ou labour puisqu'il n'y a ni retournement ni enfouissement. Cette observation est corrélée à la présence de croûtes structurales (Figure 2.2) à 88 % dans le cas du labour contre 25 % en non labour et semis direct. Dans le cas du semis direct, la surface de sol nue est complètement dégradée contrairement au labour ou au non labour où le dernier travail du sol est récent. Cependant si on prend en compte (comme sur la figure 2.2) la surface totale, la surface couverte par les résidus (non dégradée) équilibre la surface nue (très dégradée). C'est pourquoi on obtient au final une couverture en croûtes structurales assez faible. Le faciès (annexe 4) est également un peu plus dégradé dans le cas du labour, il y a une continuité totale de terre, les agrégats terreux sont soudés. Le nombre d'adventices est plus accru en semis direct, ce qui peut s'expliquer par le rôle de désherbage mécanique du labour et de l'enfouissement. On note également qu'il n'y a pas de différences significatives entre le non labour et le semis direct.

En étudiant la rugosité et plus particulièrement les coefficients de rugosité (figure 2.3 et tableau 2.1), on observe d'un point de vue général que la rugosité mesurée

Tableau 2.1 Signification des valeurs de Crr et Cpr à partir de tests statistiques

Coefficients de rugosité	Travail du sol	N	Moyenne	Ecart-type	Signification
<i>Crr</i>	Labour	7	6,3	2	0,00
	Non labour	8	9,7	1,2	0,04
	Semis direct	7	8,2	1,2	0,05
<i>Cpr</i>	Labour	7	8,8	2	0,00
	Non labour	8	12,1	0,8	0,66
	Semis direct	7	11,6	2,5	0,04

Entre LAB et NL

Entre NL et SD

Entre LAB et SD

Les valeurs supérieures à 0,10 sont considérées comme non significatives.

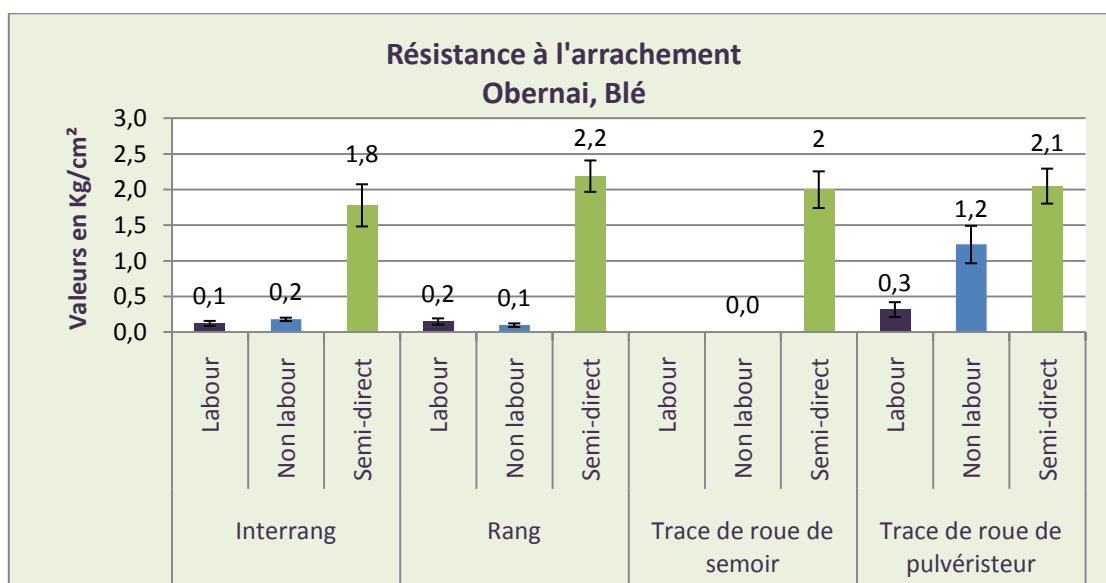


Figure 2.4 Résistance à l'arrachement selon le travail du sol, Obernai, blé

Tableau 2.2 Signification des valeurs de la résistance à l'arrachement à partir de tests statistiques

Résistance à l'arrachement	Travail du sol	N	Moyenne	Ecart-type	Signification
<i>Interrang</i>	Labour	10	0,1	0,1	0,05
	Non labour	10	0,2	0	0,00
	Semi-direct	10	1,8	0,6	0,00
<i>Rang</i>	Labour	10	0,2	0,1	0,13
	Non labour	10	0,1	0,1	0,00
	Semi-direct	10	2,2	0,4	0,00
<i>Trace de roue de pulvérisateur</i>	Labour	9	0,3	0,2	0,00
	Non labour	10	1,2	0,5	0,00
	Semi-direct	10	2,1	0,5	0,00

perpendiculairement est plus importante que la rugosité aléatoire dans le sens du travail du sol. En effet, la rugosité mesurée perpendiculairement prend en compte la rugosité due aux agrégats mais également la rugosité orientée. Cette dernière semble similaire quelque soit le travail du sol dans le cas d'une culture de blé puisque les engins utilisés dans cette culture laissent peu de marques. La rugosité aléatoire est plus importante en non labour puis en semis direct puis en labour, la surface est donc moins lisse en non labour et semis direct qu'en labour où elle a été moins protégée par les résidus et a donc été plus battue. D'autre part, la stabilité des agrégats plus élevée en non labour et semis direct (annexe 8) entraîne un affinage plus difficile à réaliser en non labour. Les résultats (annexe 4) montrent une couverture de mottes, dont le diamètre est supérieur à 2 cm, plus importante en non labour qu'en labour et qu'en semis direct. On retrouve la même tendance pour la rugosité pour l'eau. Ceci ne correspond pas aux observations précédentes des coefficients de rugosité. L'explication peut venir du fait qu'il est difficile d'enlever les résidus scellés en semis direct lors des mesures avec la chaînette, la rugosité mesurée ne prend pas seulement en compte la rugosité du sol mais également la rugosité due aux résidus scellés. Un point reste à éclaircir : les résidus scellés qui font partie intégrante de la surface du sol peuvent-ils alors entrer dans la mesure de sa rugosité ? Quant à la rugosité visuelle, toujours assez faible en semis direct, elle est moyenne en labour et en non labour.

L'étude de la macroporosité (annexe 4) montre une structure des fentes de plus en plus polygonales du semis direct au labour ainsi que des trous de nature inconnue très importants en labour et assez gros. La densité des fentes est plus élevée en labour et semis direct qu'en non labour où la dégradation est moindre. La largeur de ces fentes est très élevée en semis direct car ces parcelles ont subi des pluies depuis bien plus longtemps que le non labour et labour, puisqu'il n'y a pas eu de travail du sol qui a remis la structure de la terre à l'état initial. Les trous de vers de terre plus importants en non labour et semis direct qu'en labour permettent une bonne infiltration de l'eau de ruissellement. Le nombre plus faible en semis direct qu'en non labour peut être dû à une erreur d'appréciation compte tenu des résidus nombreux.

La résistance à l'arrachement (figure 2.4 et tableau 2.2) est très importante en semis direct, aux alentours de 2 Kg/cm². D'autre part elle ne varie pas selon que la mesure soit faite dans le rang, l'interrang ou les traces de roue. La surface d'une parcelle en semis direct est homogène, l'influence du passage des engins agricole sur le tassage du sol est très faible. En labour et non labour, la résistance à l'arrachement est très faible. La mesure n'a pas été réalisée dans les traces de roue de semoir très peu visibles sur ces deux parcelles. Dans les

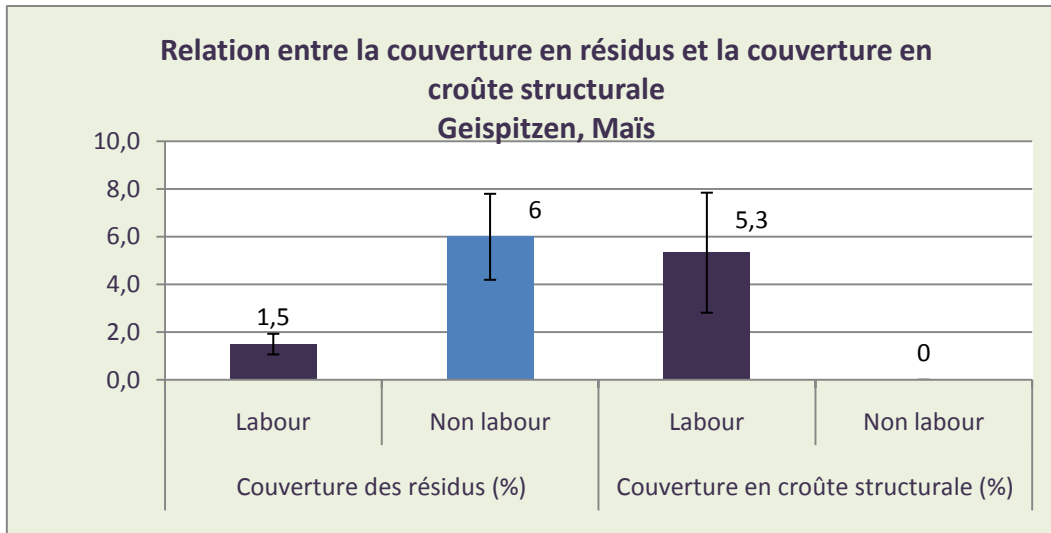


Figure 2.5 Relation entre couverture en croûtes structurales et en résidus, Geispitzen, maïs

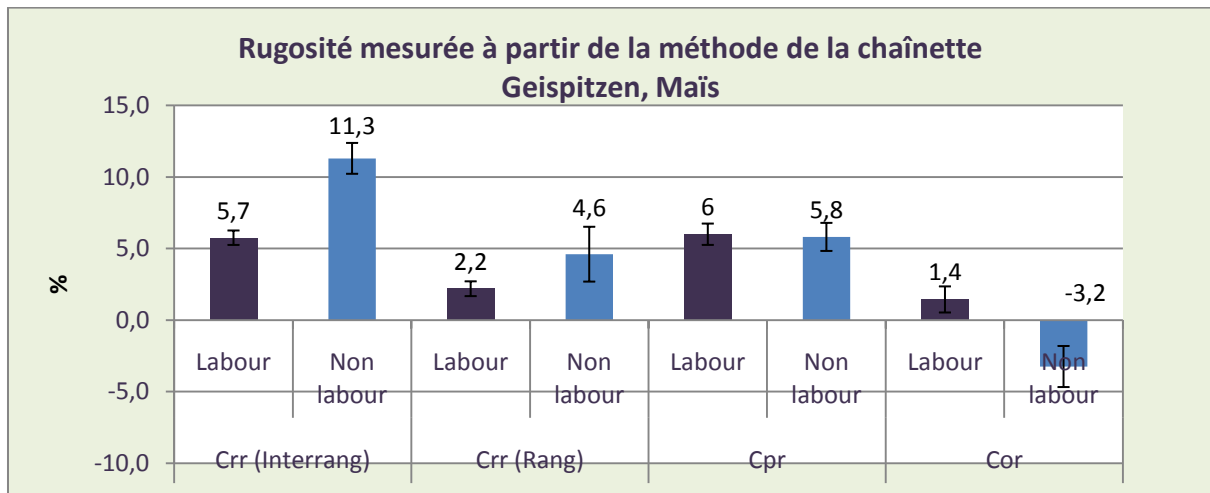


Figure 2.6 Rugosité, Geispitzen, maïs

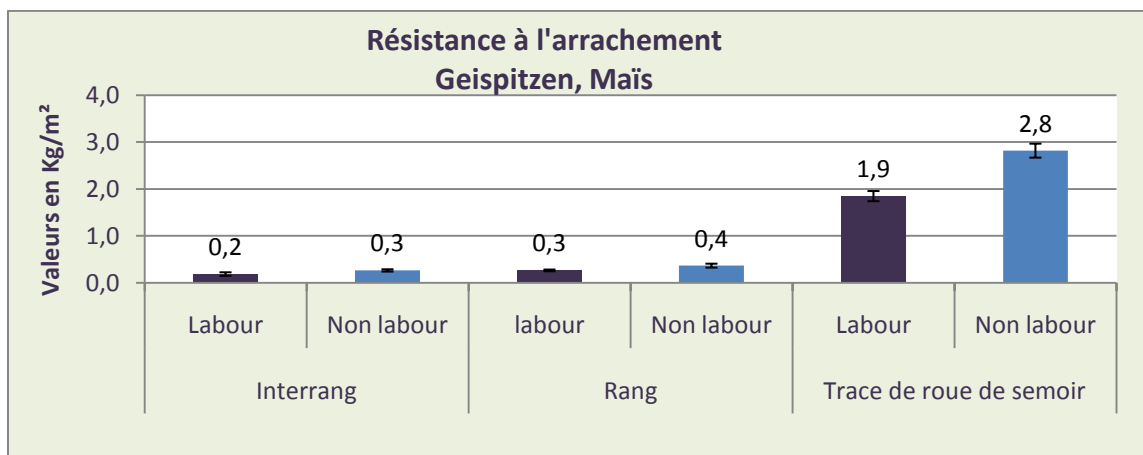


Figure 2.7 Résistance à l'arrachement, Geispitzen, maïs

traces de roue du pulvérisateur où le sol a été tassé, la résistance est plus élevée et elle est distincte entre le non labour et du labour.

En somme, le travail profond sans labour présente la surface la moins dégradée et la plus rugueuse. En semis direct, la surface est plus dégradée mais très bien protégée contre l'érosion par les résidus de culture et par la très forte résistance à l'arrachement.

2.1.2. Geispitzen, maïs : Labour/ Non labour

Le site de Geispitzen est très similaire à celui d'Obernai, le travail sans labour mis en place depuis dix ans présente une stabilité des agrégats en non labour plus importante qu'en labour (annexe 8).

Les mesures ont été faites directement après le semis, au moment de la levée du maïs. C'est pourquoi il y a peu de différences à noter entre le labour et le non labour et peu de dégradation du sol de manière générale. Cependant on peut remarquer les mêmes tendances que sur le site d'Obernai, la hauteur et la couverture de la culture (annexe 5) sont plus faibles en non labour qu'en labour, la couverture en croûtes structurales (figure 2.5) est plus importante en labour où le sol est moins protégé par les résidus, le faciès est également plus avancé. Il n'y a aucun adventice, aucun résidu scellé, le niveau sur l'échelle Boekel est le même (égal à 7).

La rugosité (figure 2.6) est très importante en non labour. Dans le rang, elle est globalement plus faible que dans l'interrang à cause de l'affinage et du tassage réalisé sur la ligne de semis. Les rugosités perpendiculaires étant les mêmes en non labour et labour, on obtient une rugosité orientée négative dans le cas du non labour. Ce résultat inattendu est dû au fait que dans le cas d'une mesure perpendiculaire, la chaînette passe sur la ligne de semis (terre fine) puis sur l'interrang (rugueux) puis une nouvelle fois sur une ligne de semis et enfin sur une trace de roue de semoir (tassé). La rugosité de l'interrang étant tellement forte en non labour, elle est supérieure à celle mesurée de façon perpendiculaire qui ne prend en compte que sur de petites portions la forte rugosité de l'interrang. Cette observation est peu répandue.

Les données provenant de l'observation des états de surface (annexe 5) sont peu significatives. Il est difficile d'affirmer que la couverture en mottes dont le diamètre est supérieur à deux centimètres est plus importante en non labour qu'en non labour. Il en est de même pour la rugosité pour l'eau. La rugosité visuelle est également identique, cela peut être dû à la différence de précision entre la chaînette et l'étude visuelle de la rugosité. Le R2

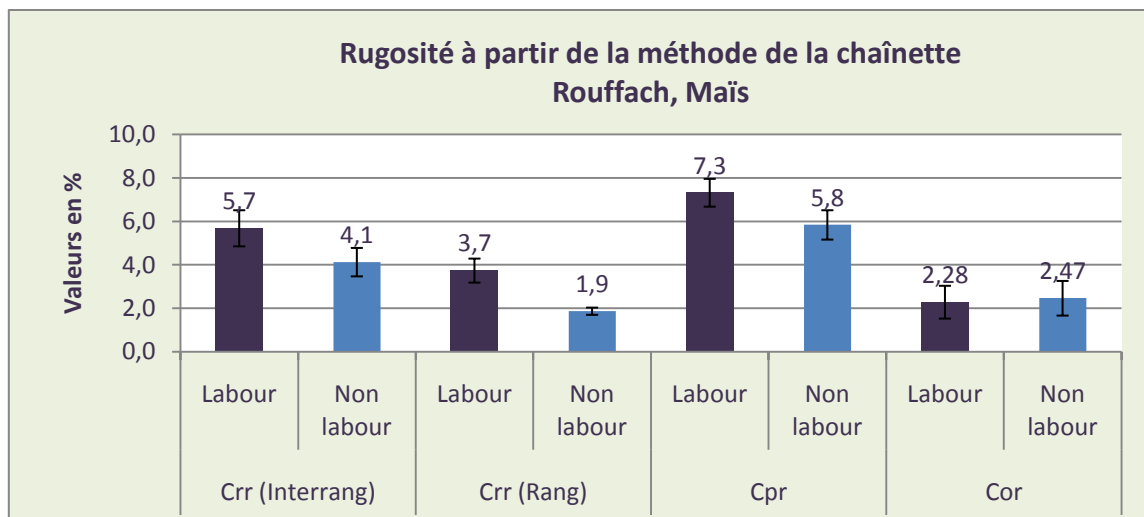


Figure 2.8 Rugosité, Rouffach, maïs

Tableau 2.3 Signification de la rugosité à partir de tests significatifs

Coefficients de rugosité	Travail sol	N	Moyenne	Ecart-type	Signification
<i>Crr (Interrang)</i>	Labour	8	5,7	1,7	0,06
	Non labour	8	4,1	1,3	0,06
<i>Crr (Rang)</i>	Labour	8	3,7	1,1	0,00
	Non labour	8	1,9	0,3	0,00
<i>Cpr</i>	Labour	8	7,3	1,3	0,04
	Non labour	8	5,8	1,4	0,04

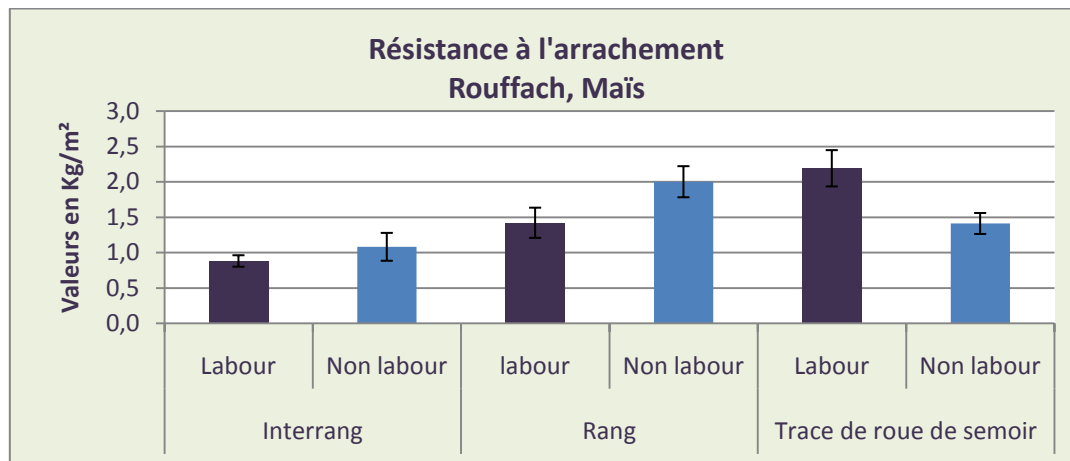


Figure 2.9 Résistance à l'arrachement, Rouffach, maïs

Tableau 2.4 Signification de la résistance à l'arrachement à partir de tests statistiques

Résistance à l'arrachement	Travail sol	N	Moyenne	Ecart-type	Signification
<i>Interrang</i>	Labour	10	0,9	0,2	0,16
	Non labour	10	1,1	0,4	
<i>Rang</i>	labour	10	1,4	0,4	0,01
	Non labour	10	2	0,4	
<i>Trace de roue de semoir</i>	Labour	10	2,2	0,5	0,00
	Non labour	10	1,4	0,3	

définit une couverture de mottes entre 2 et 5 cm. En observant les photos, on remarque que les mottes sont entre 2 et 3-4 dans le cas du labour et entre 3 et 5 dans le cas du non labour. D'autre part elles sont plus nombreuses. La méthode de la chaînette est donc plus sensible.

En labour, des fentes, formées dans les croûtes structurales, sont déjà visibles mais en faible densité et peu larges, la présence de trous est également notable tandis qu'en non labour il n'y a aucune trace de dégradation due à la pluie. En ce qui concerne les trous de vers de terre, ils sont plus nombreux une nouvelle fois en non labour (annexe 5).

La différence de résistance à l'arrachement (figure 2.7) est ici très nette entre interrang, rang et trace de roue. Elle augmente en fonction du tassement. Elle est de plus, toujours plus élevée en non labour qu'en labour où la terre a été moins affinée donc où la structure a été moins fragilisée.

2.1.3. Rouffach, maïs : Labour/ Non labour

La parcelle en non labour a été mise en place à Rouffach très récemment (2009) et la stabilité des agrégats n'est pas différente de celle du labour (annexe 8).

Il a été le dernier étudié, début mai. La dégradation (annexe 6) est donc forte car les parcelles avaient déjà été irriguées et avaient subies l'action de la pluie. Cependant les mêmes observations que précédemment peuvent être faites : la hauteur et la couverture de la culture sont plus faibles en non labour qu'en labour. En revanche, la présence des résidus en non labour est très faible et, à stabilité égale, il y a en conséquence une faible différence de couverture de croûtes structurales entre les deux parcelles. Le niveau sur l'échelle Boekel est plus haut en non labour, la surface est donc légèrement mieux conservée. Le faciès est le même. D'autre part, il n'y a pas de croûte sédimentaire mais les résidus sont déjà scellés. Il y a une couverture d'adventices plus importante qu'à Geispitzen (la culture est plus avancée).

Sur ce site, contrairement à Geispitzen, la rugosité (figure 2.8 et tableau 2.3) est plus importante en labour qu'en non labour. Cette différence est visible même au niveau de Cpr contrairement aux deux sites précédemment étudiés. En prenant en compte que le non labour sur ce site est plus récent, on pouvait s'attendre à une rugosité égale avec le labour. Elle est plus faible dans le rang que dans l'interrang et plus élevée perpendiculairement au travail du sol que dans le sens du travail du sol. En s'intéressant aux observations d'états de surface (annexe 6), on remarque que la couverture de mottes, tout comme la rugosité pour l'eau et la rugosité visuelle sont semblables pour les deux types de travail du sol.

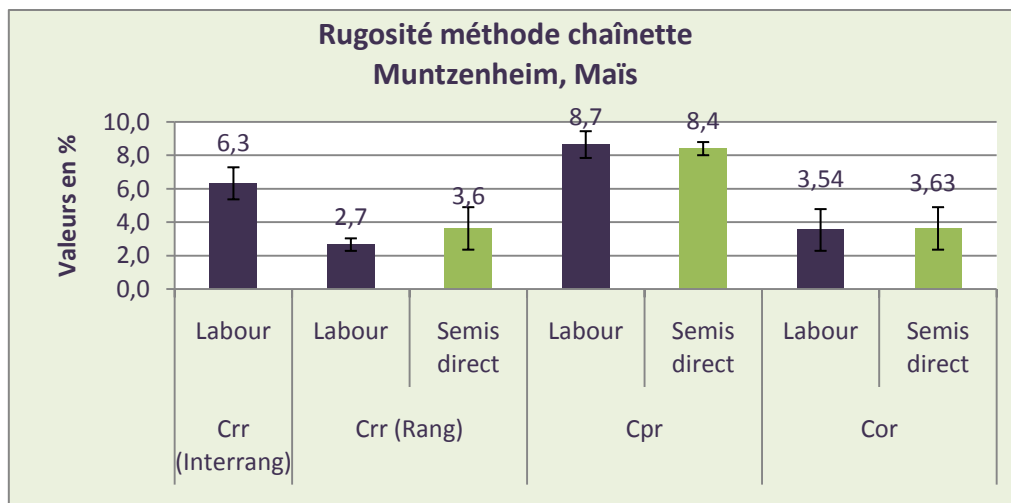


Figure 2.10 Rugosité, Muntzenheim, maïs

Tableau 2.5 Signification de la rugosité à partir de tests statistiques

Coefficients de rugosité	Tavail sol	N	Moyenne	Ecart-type	Signification
<i>Crr (Rang)</i>	Labour	9	2,7	0,7	0,40
	Semis direct	6	3,6	2,5	
<i>Cpr</i>	Labour	9	8,7	1,6	0,70
	Semis direct	6	8,4	0,8	

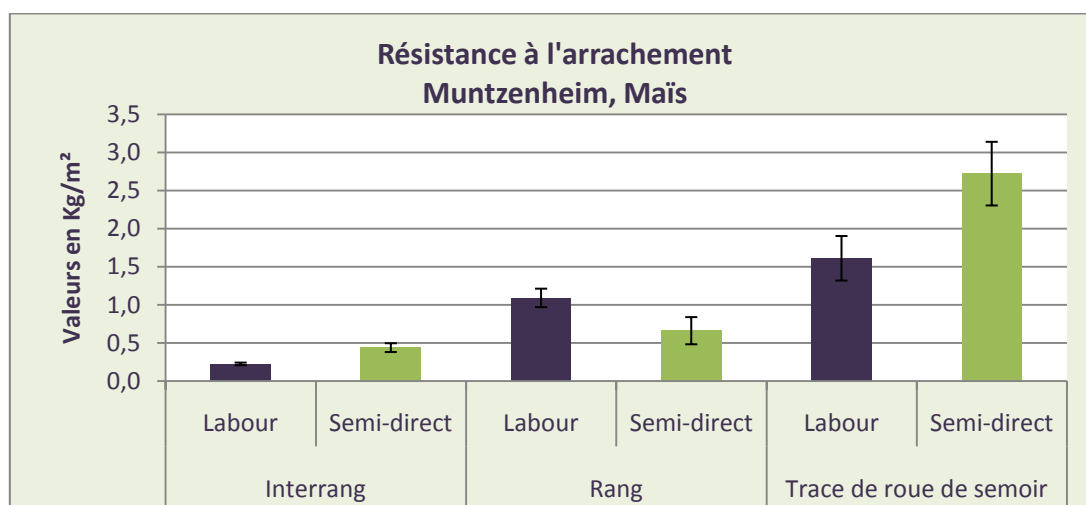


Figure 2.11 Résistance à l'arrachement, Muntzenheim, Maïs

Tableau 2.6 Signification de la résistance à l'arrachement à partir de tests statistiques

Résistance à l'arrachement	Travail du sol	N	Moyenne	Ecart-type	Signification
<i>Interrang</i>	Labour	9	0,2	0	0,00
	Semi-direct	10	0,4	0,1	
<i>Rang</i>	Labour	10	1,1	0,2	0,01
	Semi-direct	10	0,7	0,4	
<i>Trace de roue de semoir</i>	Labour	10	1,6	0,6	0,00
	Semi-direct	10	2,7	0,8	

La structure, la densité et la largeur des fentes sont similaires entre les deux types de travail du sol (annexe 6). Cependant, le nombre de trous de nature inconnue est plus important en labour et le nombre de trous de vers de terre plus important en non labour.

La résistance à l'arrachement (figure 2.9 et tableau 2.4), augmentant de l'interrang aux traces de roue, est ici plus importante en non labour sauf dans la trace de roue. On peut supposer que le sol était plus fragile en labour et donc s'est beaucoup plus tassé sous l'impact de la machine.

2.1.4. Muntzenheim, maïs : Labour/ Semis direct

Au niveau de la couverture végétale et de la battance (annexe 7), on retrouve dans les observations de Muntzenheim les mêmes conclusions que sur le site d'Obernai si ce n'est que le faciès et le niveau sur l'échelle Boekel sont le même pour les deux types de travail du sol.

La méthode de la chaînette (figure 2.10 et tableau 2.5) ne présente pas de tendance significative. Il en est de même pour les observations d'états de surface. La rugosité est similaire en labour et semis direct à Muntzenheim.

Le même constat est identifiable en ce qui concerne la macroporosité (annexe 7) et notamment le nombre de trous de vers de terre qui dans les autres sites étaient assez différents selon le type de travail du sol.

La résistance à l'arrachement (figure 2.11 et tableau 2.6) dans le labour est différente entre le rang et l'interrang puisque l'interrang est encore meuble tandis que le rang est déjà pris en masse. En revanche en semis direct, il n'y a pas de différence entre rang et interrang puisqu'il n'y a pas de travail de la ligne de semis. Les valeurs restent faibles pour un semis direct, ce qui peut être expliqué par l'effet protecteur du couvert de trèfle et l'ameublissement provoqué par les racines.

2.1.5. Conclusions et discussions

Sur tous les sites présentés, la hauteur et/ ou la couverture de la culture sont plus importants en labour qu'en non labour et semis direct.

Il y a toujours une corrélation entre la couverture végétale et résiduelle et la battance, plus le sol est couvert, moins il est battu mis à part en semis direct où le sol est toujours plus dégradé.

La mesure de la rugosité avec la chaînette permet une différenciation plus fine que celle par le biais de l'observation de la classe de rugosité. Elle est également plus objective. Il semble que les parcelles en TCSL soient plus rugueuses que celle en labour, bien que la

différence soit parfois faible. L'ancienneté des TPSL semble le facteur explicatif car les TPSL plus récents de Rouffach et Muntzenheim ne montrent pas ces effets.

Au niveau de la macroporosité, les trous de vers de terre (anéciques) sont plus importants en TCSL qu'en labour, ce qui permet une meilleure infiltration d'après la bibliographie, et ce qui pourra être confirmé ou non par les résultats de Lucile Winterer. La technique culturale sans labour entraîne des gradients dans la couche superficielle du sol. Ainsi, la matière organique s'accumule en surface et protège la surface du sol. La stabilité structurale est améliorée et la rétention d'eau et de minéraux donne abri et nourriture aux organismes du sol. L'activité biologique est plus intense, notamment celle des vers de terre anéciques.

On peut considérer que les fentes et les trous de nature inconnue améliorent également l'infiltration mais ils apparaissent lorsqu'il y a une dégradation de la surface et l'apparition de croûtes qui réduisent l'infiltration. D'autre part ces fentes et trous sont souvent seulement en surface et se bouchent facilement au cours des orages. Leurs aspects positifs sont donc à nuancer. On ne peut pas conclure qu'il y ait plus de fentes et plus large dans un type de travail du sol, la seconde campagne éclairera peut-être ces premières données. En revanche, il y a plus de trous en labour qu'en TCSL.

Enfin, la résistance à l'arrachement est nettement plus élevée en TCSL qu'en labour.

En somme, les TCSL protègent la surface de l'érosion. Ils semblent permettre une meilleure infiltration et une réduction de l'arrachement mais les résultats ne sont pas encore assez distincts. La seconde campagne permettra de confirmer (ou non) ces tendances. D'autre part, le travail profond sans labour se différencie mieux du labour que le semis direct du labour et du non labour, les avantages des TCSL sont plus nets en travail profond sans labour qu'en semis direct. Il s'agit de prendre également en compte la difficulté des mesures en semis direct à cause des couverts de résidus et des couverts végétaux.

2.2. L'influence du type de culture

2.2.1. Rouffach : Blé/ Maïs

Dans cette partie, les états de surface et les paramètres d'érodibilité à une date donnée sont étudiés en fonction de la culture.

Dans cette situation, la couverture et la hauteur de la culture (annexe 6) sont beaucoup plus importantes en culture de blé qu'en culture de maïs ce qui freine le ruissellement. La couverture des résidus est la même (2,3 %) tout comme la couverture d'adventices (0,3 %) sachant que la parcelle de blé a été traitée avant l'étude des états de surface. Dans les deux

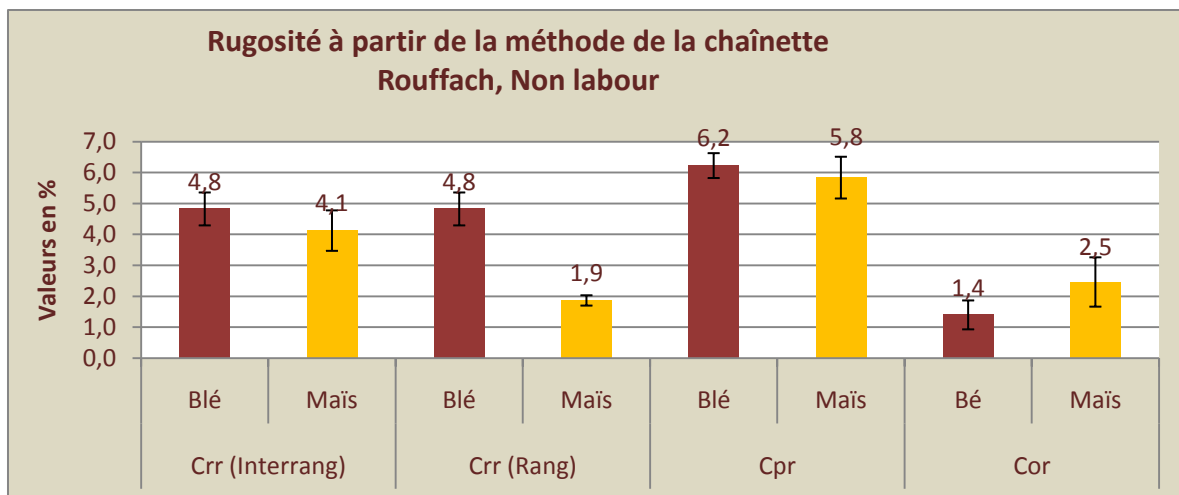


Figure 2.12 Rugosité, Rouffach, non labour

Tableau 2.7 Signification de la rugosité à partir de tests statistiques

Coefficients de rugosité	Culture	N	Moyenne	Ecart-type	Signification
Crr (Interrang)	Blé	4	4,8	1,1	0,35
	Maïs	8	4,1	1,3	
Crr (Rang)	Blé	4	4,8	1,1	0,01
	Maïs	8	1,9	0,3	
Cpr	Blé	4	6,2	0,8	0,55
	Maïs	8	5,8	1,4	

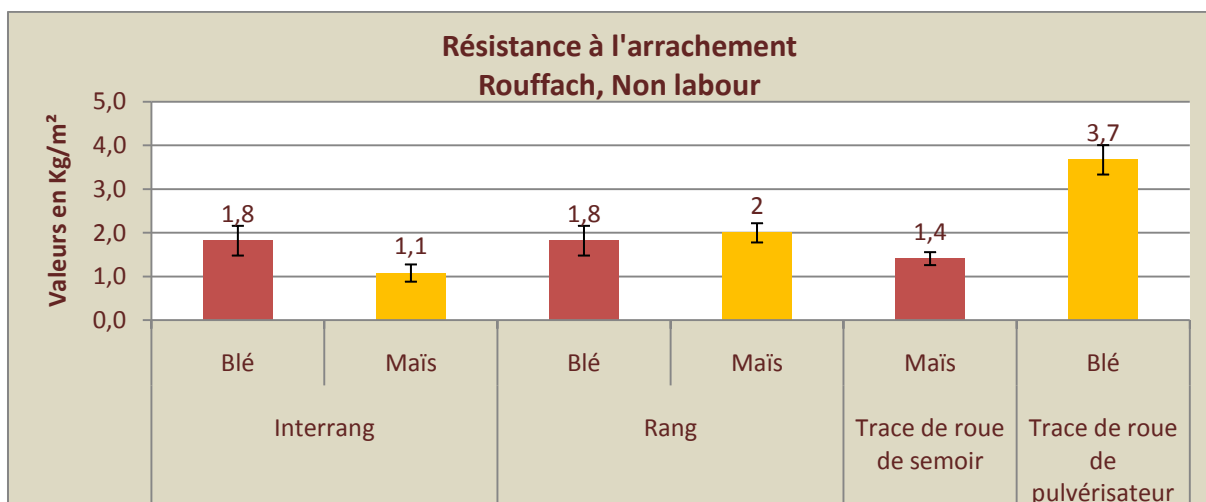


Figure 2.13 Résistance à l'arrachement, Rouffach, non labour

Tableau 2.8 Signification de la résistance à l'arrachement

Résistance à l'arrachement	Culture	N	Moyenne	Ecart-type	Signification
Interrang	Orge	10	1,6	0,2	0,00
	Maïs	9	0,2	0	
Rang	Orge		1,6	0,2	0,00
	Maïs	10	1,1	0,2	

parcelles, les résidus sont scellés suite à une première influence de la pluie et de l'irrigation (beaucoup plus importante en blé) sur le sol.

En ce qui concerne la battance (annexe 6), à partir de la couverture en sol nu et de la couverture en croûtes structurales et sédimentaires, le pourcentage de surface nue dégradée a été calculé. Il est ainsi remarquable qu'en toute logique, la surface nue en blé soit plus dégradée puisqu'elle a subi plus d'intempéries. Cependant toute la surface couverte est restée à peu près intacte. Il y a donc proportionnellement à la culture de maïs moins de dégradation en culture de blé. Le faciès est le même : agrégats soudés et contours peu visibles. En revanche, le niveau sur l'échelle Boekel est plus bas pour le blé, où l'on note des croûtes sédimentaires, que pour le maïs. Dans le même sens, il n'y a pas de mottes supérieures à 2 cm de diamètre en culture de blé, elles sont fondues dans la surface. Cette étape suit celle des mottes scellées, c'est pourquoi on n'en trouve pas en observant les états de surface du blé.

La rugosité (figure 2.12 et tableau 2.7) dans l'interrang est similaire entre les deux cultures (les différences ne sont pas significatives) mais il y a une nette différence dans le rang puisqu'il n'y a pas de lit de semence plus aplanié dans la culture de blé contrairement à la culture de maïs. La rugosité mesurée perpendiculairement est semblable dans les deux cultures. Cependant celle mesurée dans le blé est plus aléatoire puisqu'il a été une difficulté d'apposer la chaînette directement sur le sol à cause des pousses de blé. La rugosité orientée plus élevée en maïs s'explique par la différence de motifs agraires entre les deux cultures, il est plus distinct en maïs. La rugosité visuelle (annexe 6) est plus élevée en maïs avec des mottes entre 2 et 5 cm tandis que la surface en blé est totalement lisse, de même les cailloux sont plus en surface dans la culture de maïs alors que dans la culture de blé ils sont fondues dans le sol. La rugosité pour l'eau est similaire.

La structure des fentes (annexe 6) est la même, avec une densité un peu plus élevée en blé. En revanche, les fentes sont beaucoup plus larges en blé. Les trous de nature inconnue et de vers de terre n'ont pas été comptabilisés.

La résistance à l'arrachement (figure 2.13 et tableau 2.8) est plus importante en blé dans l'interrang et semblable entre le rang de la culture de maïs et l'interrang de la culture de blé.

2.2.2. Muntzenheim : Orge/ Maïs

Sur ce site, la culture d'hiver comparée au maïs est l'orge. Le travail du sol est le non labour. Les observations des états de surface n'ont pu être réalisées sur l'orge à cause de la culture trop haute. Cependant, après réflexion, il a semblé préférable d'avoir deux sites à

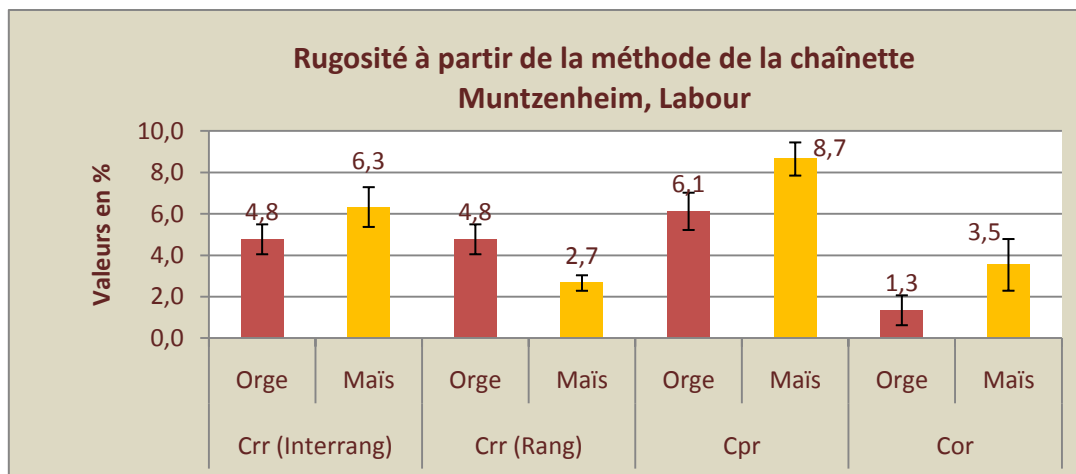


Figure 2.14 Rugosité, Muntzenheim, labour

Tableau 2.9 Signification de Crr et Cpr

Coefficients de rugosité	Tavail sol	N	Moyenne	Ecart-type	Signification
<i>Crr (Interrang)</i>	Orge	6	4,8	1,4	0,10
	Maïs	9	6,3	1,9	
<i>Crr (Rang)</i>	Orge	6	4,8	1,4	0,01
	Maïs	9	2,7	0,7	
<i>Cpr</i>	Orge	3	6,1	1,8	0,12
	Maïs	9	8,7	1,6	

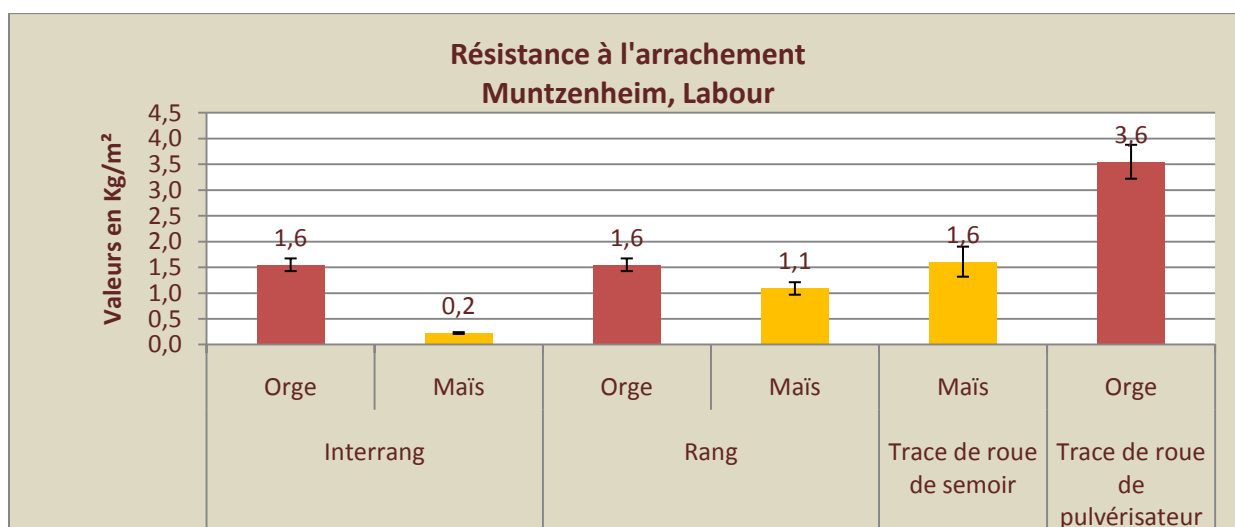


Figure 2.15 Résistance à l'arrachement, Muntzenheim, labour

Tableau 2.10 Signification des différences de résistance à l'arrachement

Résistance à l'arrachement	Culture	N	Moyenne	Ecart-type	Signification
<i>Interrang</i>	Blé	10	1,8	0,7	0,01
	Maïs	10	1,1	0,4	
<i>Rang</i>	Blé	10	1,8	0,7	0,49
	Maïs	10	2	0,4	

comparer donc ces observations seront faites en seconde campagne à partant de l'hypothèse que la dégradation du sol des cultures d'hiver durant le printemps est faible. Des mesures de rugosité par la méthode de la chaînette et de résistance à l'arrachement ont pu être effectuées. Ce sont ces résultats qui sont exposés ici.

Comme sur le site de Rouffach, la rugosité (figure 2.14 et tableau 2.9) dans l'interrang est semblable dans les deux parcelles (les résultats ne sont pas significativement différents). En revanche, pour les mêmes raisons que précédemment, dans le rang elle est plus faible en maïs. De même, la rugosité orientée est plus élevée en maïs qu'en blé.

La résistance à l'arrachement (figure 2.15 et tableau 2.10) est plus élevée dans l'orge que dans le maïs dans l'interrang et le rang. Les valeurs dans l'orge sont similaires à celles trouvées dans le blé ce qui montre une cohérence entre les différentes cultures d'hiver. En revanche, la résistance à l'arrachement dans la parcelle de maïs de Muntzenheim est plus faible, cette différence est explicable par la différence de technique de travail du sol, en labour à Muntzenheim et en non labour à Rouffach. Cette différence a apparemment moins d'influence sur les cultures d'hiver.

2.2.3. Conclusions

Bien que l'étude d'un plus grand nombre de sites nous aurait permis d'établir des conclusions avec plus d'assurance, nous pouvons observer qu'au début du printemps, juste après le semis du maïs, la surface du sol est plus dégradée en culture d'hiver qu'en culture de printemps. Tout l'intérêt est d'étudier l'évolution de ce phénomène. En effet, la surface de sol d'une culture d'hiver étant couverte, il est fort probable que la dégradation depuis le début du mois d'avril soit moins forte que celle d'une culture de printemps. Cependant, la densité des pieds étant très dense pour les céréales à paille, il est probable que la croissance et le développement des racines permettent de casser les croûtes formées. Ceci n'est pas le cas pour une culture de maïs.

2.3. L'intensité de l'érosion selon les types de sol

Aucune interprétation scientifique n'est possible à partir des résultats de la première campagne au niveau de la différence selon les types de sols. Ils sont cependant répertoriés dans l'annexe 9 et seront utiles lors de la comparaison avec la deuxième campagne.

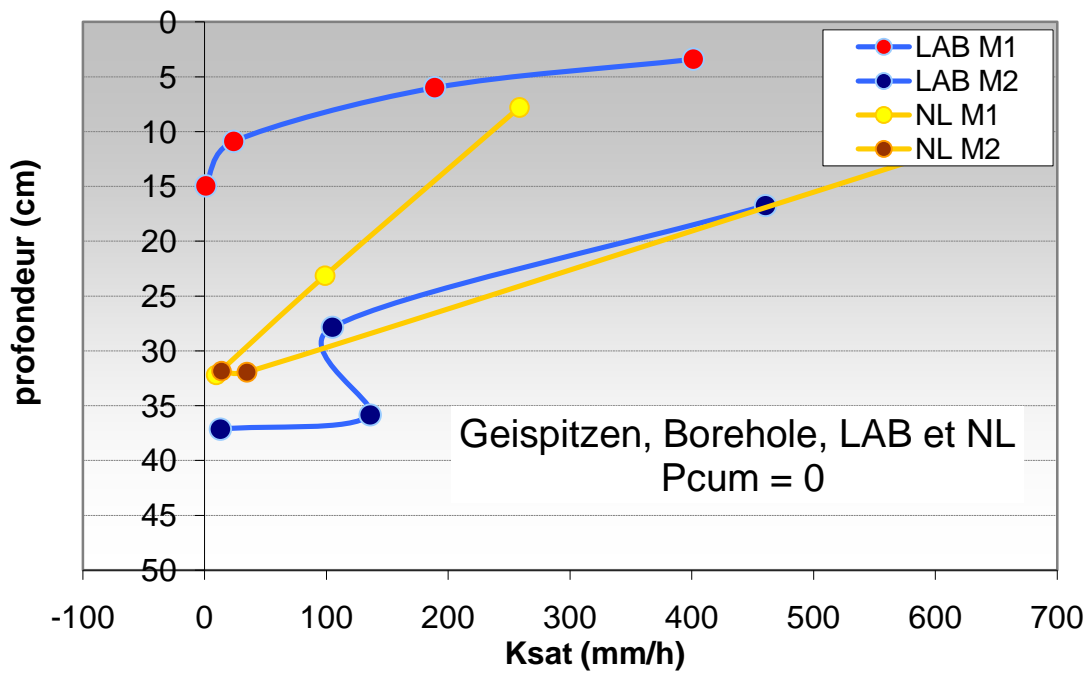


Figure 2.16 Perméabilité des couches du sol, Geispitzen, Inverse Borehole

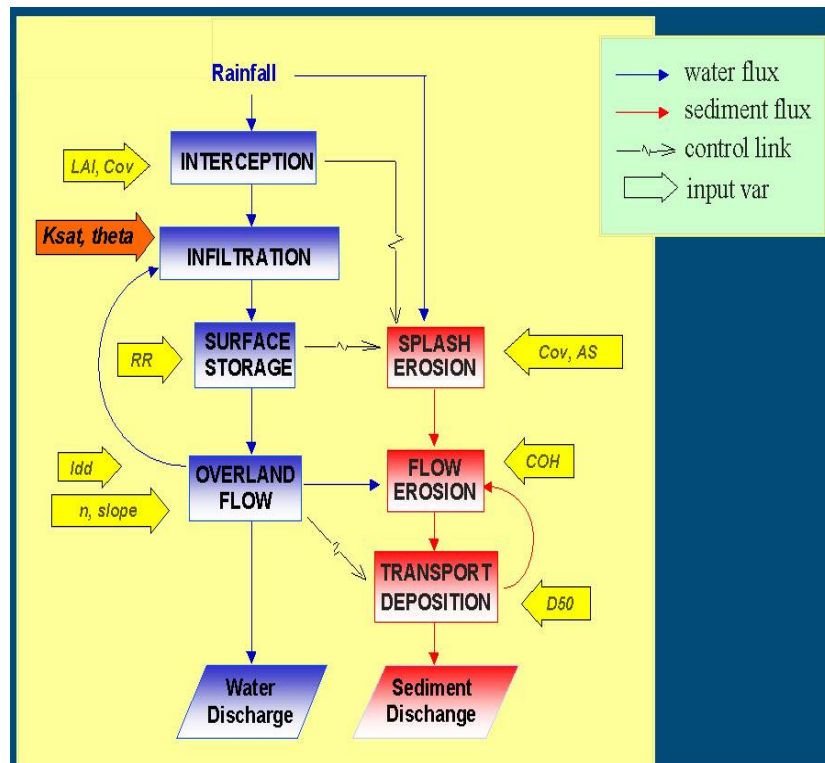


Figure 3.1 Paramètres utilisés dans le modèle LISEM

2.4. La perméabilité des couches proches de la surface : exemple du site de Geispitzen

La méthode Inverse Borehole est une méthode de mesure qui prend environ une heure trente et dont l'analyse des résultats est relativement fastidieuse. D'autre part, c'est une étude qui restait optionnelle dans mon stage. Pour ces différentes raisons et par manque de place, j'ai décidé de vous présenter seulement l'étude du site de Geispitzen, à titre d'exemple. C'est le site dont l'ARAA connaît le mieux le fonctionnement ; c'est pourquoi il a été choisi.

Sur la figure 2.16 présentant la perméabilité du sol en fonction de la profondeur sont exposées deux mesures réalisées sur la parcelle labourée de Geispitzen et deux autres réalisées sur la parcelle non labourée.

Les mesures du labour sont très différentes l'une de l'autre. La première présente une rapide diminution de la perméabilité sur une faible profondeur. Ce comportement peut être la conséquence d'une mesure sur une zone compactée où le labour n'a pas eu l'effet escompté et où le gel dégel n'a pas fonctionné. La seconde montre une diminution assez cohérente de la perméabilité (en comparaison des deux mesures en non labour) mais avec une valeur faible entre 28 et 37 cm de profondeur à cause d'une probable semelle de labour.

En revanche les mesures en non labour sont assez homogènes, la perméabilité diminue de façon constante. Cette observation peut être corrélée avec le profil cultural réalisé par l'ARAA durant le printemps 2011 qui a montré un sol homogène, sans zone anoxique compactée. Les faibles pluies hivernales ont déclenché peu ou pas de perturbations dans la structure du sol.

3. Exemple d'application : le modèle LISEM

La figure 3.1 présente les paramètres à rentrer dans le modèle pour avoir la modélisation du ruissellement, de l'érosion et du dépôt des sédiments. Les principaux indicateurs utilisés lors de mon stage sont RR, Cov, AS et COH. RR est la rugosité aléatoire, c'est-à-dire l'écart type de la hauteur de la surface du sol (corrigée en cas de pente). Cov désigne la couverture végétale et AS la stabilité des agrégats. COH représente la résistance à l'arrachement par le ruissellement, c'est le paramètre cohésion.

Pour cette application, nous avons choisi le bassin de Lampertheim situé dans la région du Kochersberg au Nord/ Nord-Ouest de Strasbourg.

Nous avons comparé quatre situations :

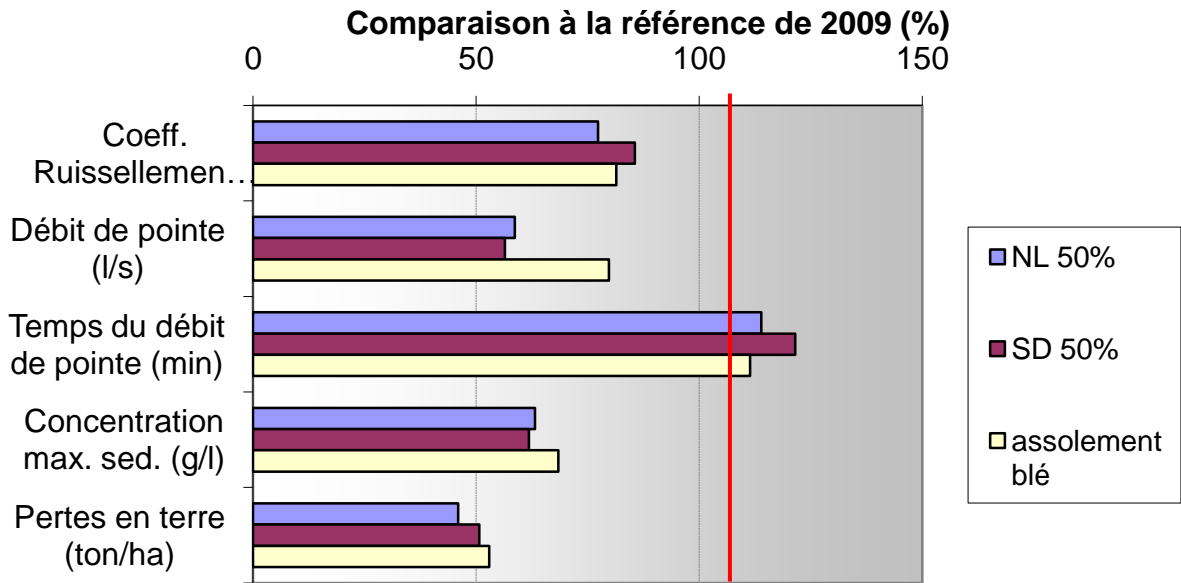


Figure 3.2 Simulations de LISEM comparées à la référence 2009

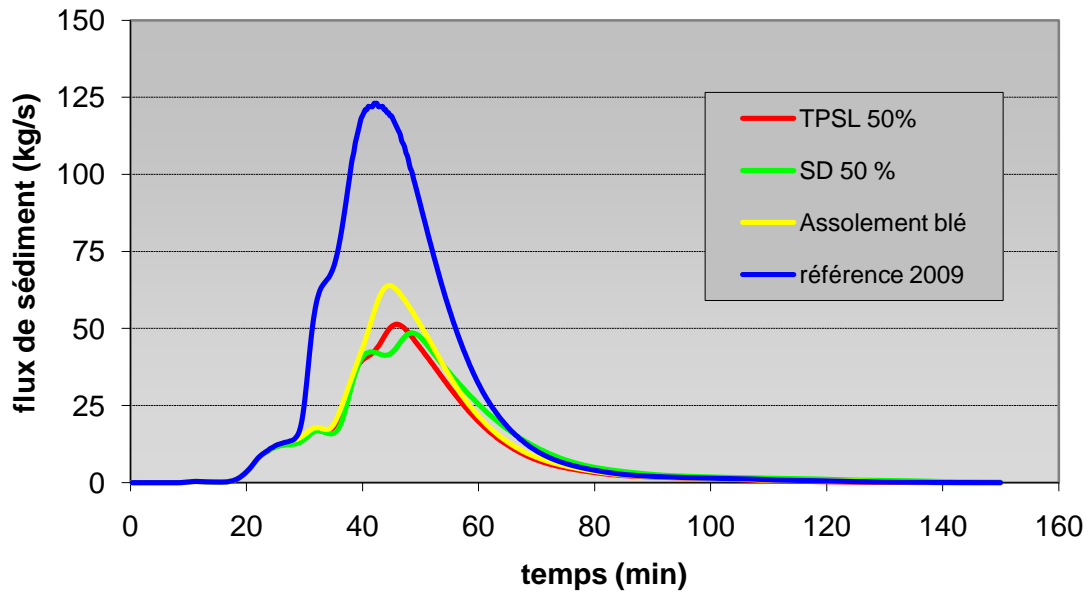


Figure 3.3 Exemple de résultats fournis par LISEM : le flux de sédiments

- La situation réelle du bassin avec l'assolement de 2009, avec environ 80 % de culture de maïs et 20% de blé sur les terres arables, tout en labour (référence)
- La première situation modélisée avec l'assolement de 2009 mais une utilisation du non labour (NL 50%) sur 50% de la surface en maïs et blé
- La seconde situation modélisée avec l'assolement de 2009 mais une utilisation du semis direct (SD 50%) sur 50% de la surface en maïs et blé
- La troisième situation modélisée avec une augmentation de la surface en blé dans l'assolement (sur environ 60 % des terres arables)

Les valeurs des paramètres hauteur de la culture, couverture de la culture, Random Roughness factor, résistance à l'arrachement ont été rentrés dans le modèle en utilisant les résultats du chapitre 2 pour chaque situation modélisée. Les valeurs des paramètres non encore disponibles comme les paramètres d'infiltrabilité proviennent de la bibliographie ou de données disponibles à l'ARAA.

Dans les trois types de situations, (figure 3.2) les pertes en terre sont divisées par deux vis-à-vis de la référence. On observe également que la réduction de l'érosion est plus forte que la réduction du ruissellement. La combinaison d'un assolement avec 50% des surfaces en blé et d'un travail du sol à 50% en TCSL pourrait donner des résultats encore meilleurs.

Le flux de sédiments (figure 3.3) est également bien réduit en TCSL et en culture de blé, il n'y a pas de différence entre le semis direct et le TPSL pour ce caractère.

CONCLUSION

Les résultats montrent que les techniques culturales sans labour ont un réel effet de réduction de la battance et d'augmentation de la résistance à l'arrachement et de la macroporosité. Ainsi, le ruissellement est réduit et transporte moins de particules de terre. L'efficacité du non labour augmente avec son ancienneté sur la parcelle concernée. Le travail effectué permet le paramétrage « printemps » du modèle d'érosion LISEM pour des situations encore peu connues auparavant. La deuxième campagne de terrain, encore à effectuer, permettra le paramétrage « début été » pour les mêmes modalités.

Les méthodes testées, notamment la chaînette pour mesurer la rugosité et Inverse Borehole pour étudier la perméabilité qui avaient encore été peu utilisées, n'ont pas eu la même efficacité. La chaînette s'est révélée très précise et fiable malgré sa simplicité mais assez difficile à mettre en œuvre dans les cultures en semis direct où les résidus sont nombreux et où il y a quelques fois des couverts. La méthode Inverse Borehole n'a pas été assez approfondie durant ce stage, son utilisation doit être améliorée, notamment au niveau de la détermination du nombre de mesures à réaliser pour avoir un résultat représentatif de la parcelle.

Le fait d'avoir pu réaliser l'analyse et l'interprétation des mesures de la première campagne avant de réaliser la seconde m'a permis de prendre du recul sur mon travail sur le terrain. J'ai pu voir les points où je devrais améliorer ma rigueur et je me suis rendue compte de l'importance des répétitions (répétitions fastidieuses sur le travail de terrain). D'autre part lors de cette seconde campagne, l'accent sera porté sur le semis direct où les mesures sont plus difficiles à faire et souvent moins nombreuses ce qui nuit à la signification des résultats.

D'un point de vue plus personnel, ce stage a été très enrichissant. J'ai pu réaliser des activités variées : des mesures sur le terrain, des études en laboratoires, de la recherche appliquée dans l'interprétation de mes données, de la modélisation, qui m'ont permis d'appréhender l'étude des phénomènes érosifs à différentes échelles. Ce premier stage en entreprise m'a permis de découvrir le milieu professionnel et de préciser mes projets d'études et de métier mais également d'acquérir de l'autonomie et d'améliorer ma capacité à prendre des initiatives. Cependant, sa très courte durée a empêché une utilisation globale de tous les paramètres et une réelle interprétation prenant en compte les données d'infiltrométrie de Lucile Winterer. Les faibles quantités de pluie qui sont tombées durant la période entre les deux campagnes sont aussi un aspect un peu décevant qui ne permettra pas d'avoir des résultats vraiment concluants.

Références bibliographiques :

B. ALI (2008), *Typologie fonctionnelle des états de surface du sol pour l'extrapolation des propriétés hydo-érosives*, Université Louis Pasteur Strasbourg, Institut de mécanique des fluides et des solides, CNRS, Rapport de thèse.

B. AMBROISE (1999), *La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant- Processus, facteurs, modèles*, Office Fédéral de l'Education et de la Science/ Suisse.

R. ARMAND (2009), *Etude des états de surface du sol et de leur dynamique pour différentes pratiques de travail du sol, mise au point d'un indicateur de ruissellement*, Université de géographie de Strasbourg, Rapport de thèse.

A.V AUZET (1987), *Erosion des sols dans les régions de grande culture : aspect agronomique*, CEREG, Organisation-Environnement, Rapport de thèse.

L.H. CAMMERAAT, L.P.H. van BEEK, L.K.A DORREN (2001), *Ecoslopes – Field protocol*, eco-engineering and conservation of slopes for long-term protection from erosion, landslides and storms, Ecoslopes project.

P.CASTILLON, J.C. GERMON, J. LABREUCHE, J.F. OUVRY, B. REAL, C. LE SOUDER, S. de TOURDONNET (2007), *Evaluation des impacts environnementaux des techniques culturales sans labour (TCSL) en France*, ADEME, ARVALIS, APCA, AREAS, ITB, CETIOM, IFVV, rapport final.

J.E. GILLEY, E.R. KOTTWITZ (1995), *Random roughness assessment by the pin and chain method*, Biological system Engineering : Papers and publications, University of Nebraska-Lincoln.

Y. LE BISSONNAIS, C. LE SOUDER (2005), *Qualité des sols – Mesure de la stabilité des agrégats de sols pour l'évaluation de la sensibilité à la battance et à l'érosion hydrique*, Norme AFNOR NFx31-515.

S. MERRILL, C. HUANG, T.M. ZOBECK, D.L. TANAKA (1999), *Use of the chain set for scale-sensitive and erosion relevant measurement of soil surface roughness*, Purdue University and USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.

E. ROOSE (1996), *Méthodes de mesure des états de surface du sol, de la rugosité et des autres caractéristiques qui peuvent aider au diagnostic de terrain des risques de ruissellement et d'érosion, en particulier sur les versants cultivés des montagnes*, ORSTOM-Laboratoire d'étude du comportement des sols cultivés de Montpellier.

Soil Thematic Strategy (2006), European Commission Environment.

ANNEXE 2 : Codage rugosité et faciès

ANNEXE 3 : Echelle Boekel

Tableau 10 : Description du paramètre faciès

Faciès	F0	F11	F1	F12	F2	
Aspect	Tous fragments parfaitement distincts	Fragments soudés mais contours encore reconnaissables	Fragments soudés, contours disparus, pas de signe de dispersion	Continuité totale de terre fine	Continuité totale de terre fine et grossière	Continuité totale avec signes de "dispersion"
Code STREAM	0	1		12	2	

Tableau 11 : Description du paramètre rugosité dans le sens du travail du sol ou perpendiculairement à ce dernier

Code STREAM	Rugosité
0	Surface très affinée ou très battue
D<1 cm	Ex : semis de blé très battu, chantier de récolte
1	Existence de barrages discontinus et de petits bourrelets entourant de petites dépressions
1<D<2	
2	Fort % _{app} de mottes > 2 cm
2<D<5	Ex : semis de blé motteux, déchaumage à dents battu // au travail du sol
3	Nombreux "massifs" entourant des dépressions
5<D<10	Ex : déchaumage à dents, à socs très altéré en travers ; déchaumage peu altéré en long
4	Etat très motteux, relief serré, forte discontinuité dans le sens du travail du sol
10<D<15	Ex : déchaumage à socs peu altérés
5	Rugosité maximale
D>15 cm	Ex : état initial des labours ou des déchaumages à socs

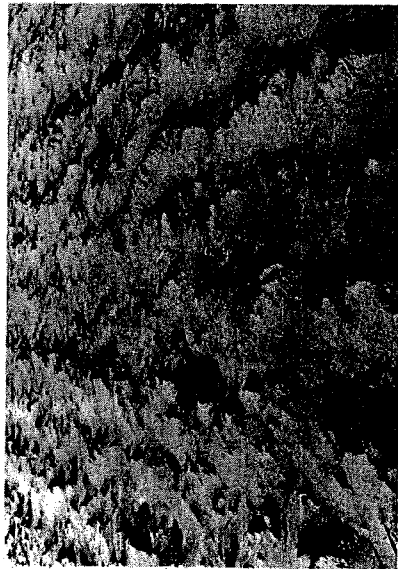
(NB : D=dénivellation)



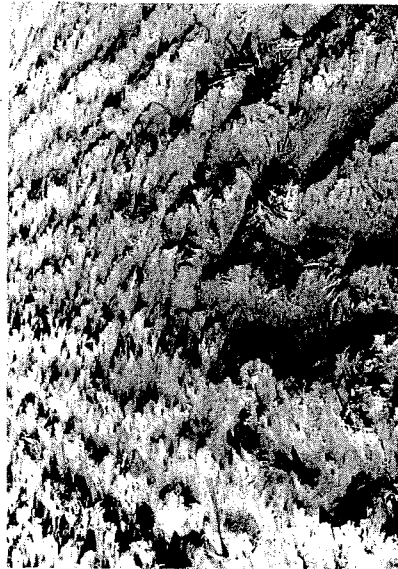
1



2



3



4

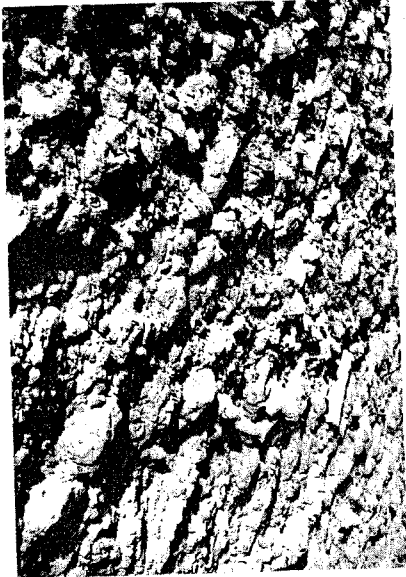
Afb. 5a Beoordeling van de verslemping van de grond, de cijfers 1-4 geven de waardering van de mate van de verslemping weer (P. Boekel, 1970)



5



6



7



8

Afb. 5b Beoordeling van de verslempling van de grond, de cijfers 5-8 geven de waardering van de mate van de verslempling weer (P. Boekel, 1970)

ANNEXE 4 : Photos et résultats d'Obernai



Blé, labour



Blé, non labour



Blé, semis direct

Couverture végétale	TravailSol	N	Moyenne	Ecart-type
<i>Couverture de la culture (%)</i>	Labour	3	35,7	9,0
	Non labour	3	43,3	9,1
	Semis direct	3	25,7	2,3
<i>Hauteur de la culture (cm)</i>	Labour	3	23,7	2,3
	Non labour	3	21,7	1,2
	semis direct	3	23,0	0
<i>Couverture des résidus (%)</i>	Labour	3	0,3	0,6
	Non labour	3	14,3	7,5
	semis direct	3	26,3	20,6
<i>Couverture des adventices (%)</i>	Labour	3	0	0
	Non labour	3	0,3	0,6
	semis direct	3	2,7	3,8
Battance	TravailSol	N	Moyenne	Ecart-type
<i>Couverture en croûtes structurales (%)</i>	Labour	3	88,3	2,9
	Non labour	3	23,5	6,5
	semis direct	3	27,3	17,8
<i>Couverture en croûtes sédimentaires (%)</i>	Labour	3	0	0,0
	Non labour	3	0	0,0
	semis direct	3	0	0,0
Facies	Labour	3	F12	0,6
	Non labour	3	F1	0,0
	semis direct	3	F1	0,0
Echelle Boekel	Labour	3	6	0,0
	Non labour	3	6	0,0
	semis direct	3	6,5	0,0

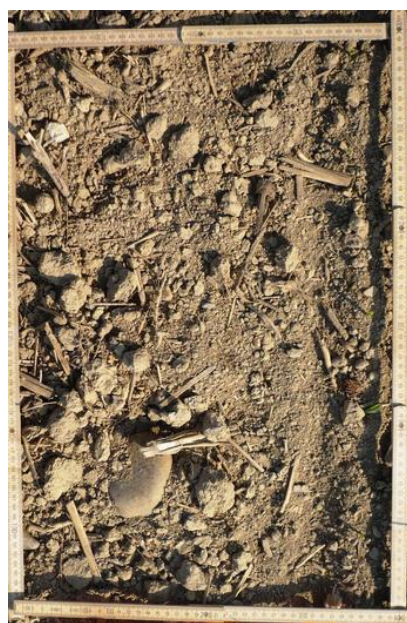
Rugosité	TravailSol	N	Moyenne	Ecart-type
<i>Présence de mottes scellées (oui/non)</i>	Labour	3	Oui	0
	Non labour	3	Oui	0
	semis direct	3	Oui	0
<i>Couverture de mottes > 2cm (%)</i>	Labour	3	3,3	1,2
	Non labour	3	7,5	0,9
	semis direct	3	1,5	0,9
<i>Rugosité visuelle</i>	Labour	3	R2	0,6
	Non labour	3	R1 R2	0
	semis direct	3	R0 R1	1
<i>Rugosité pour l'eau minimale (cm)</i>	Labour	3	0,7	0,3
	Non labour	3	1	0
	semis direct	3	0,7	0,3
<i>Rugosité pour l'eau maximale (cm)</i>	Labour	3	2,8	0,6
	Non labour	3	4	1,0
	semis direct	3	2,7	0,6

Macroporosité	TravailSol	N	Moyenne	Traduction	Ecart-type
<i>Structure des fentes</i>	Labour	3	2,5	Lignes, polygones discontinus	0,9
	Non labour	3	1,8	Lignes courtes et dispersées	1
	semis direct	3	1	Dispersées	1
<i>Densité des fentes</i>	Labour	3	3,5	Moyenne (à forte)	0,5
	Non labour	3	2,0	Faible	1
	semis direct	2	3,0	Moyenne	0
<i>Largeur des fentes</i>	Labour	3	1,3		0,3
	Non labour	3	1,2		0,3
	semis direct	2	3		0,7
<i>Nombre de trous de vers de terre</i>	Labour	3	0		0
	Non labour	3	6,3		1,2
	semis direct	3	5		0
<i>Nombre de trous non identifiés</i>	Labour	3	5,7		1,2
	Non labour	3	3,3		2,9
	semis direct	3	0		0

ANNEXE 5 : Photos et résultats de Geispitzen



Maïs, labour



Maïs, non labour

Couverture végétale	TravailSol	N	Moyenne	Ecart-type
<i>Couverture de la culture</i>	Labour	3	1	0
	Non labour	3	1	0
<i>Hauteur de la culture</i>	Labour	3	5,2	0,8
	Non labour	3	3	0
<i>Couverture des résidus</i>	Labour	3	1,5	0,9
	Non labour	3	6	3,6
<i>Présence de résidus scellés</i>	Labour	3	Non	0
	Non labour	3	Non	0,6
<i>Couverture des adventices (%)</i>	Labour	3	0	0
	Non labour	3	0	0

Battance	TravailSol	N	Moyenne	Ecart-type
<i>Couverture en croûte structurale (%)</i>	Labour	3	5,3	5,0
	Non labour	3	0	0
<i>Couverture en croûte sédimentaire (%)</i>	Labour	3	0	0
	Non labour	3	0	0
<i>Facies</i>	Labour	3	F11	0,6
	Non labour	3	F0	0
<i>Echelle Boekel</i>	Labour	3	7	0
	Non labour	3	7	0

Rugosité	TravailSol	N	Moyenne	Ecart-type
<i>Couverture des mottes > 2cm (%)</i>	Labour	3	6,9	1,8
	Non labour	3	8,5	1,5
<i>Présence de mottes scellées (oui/non)</i>	Labour	3	Non	0
	Non labour	3	Non	0
<i>Rugosité visuelle</i>	Labour	3	R2	0,6
	Non labour	3	R2	0,6
<i>Rugosité pour l'eau min (cm)</i>	Labour	3	0,5	0
	Non labour	3	0,7	0,3
<i>Rugosité pour l'eau max (cm)</i>	Labour	3	1,6	0,1
	Non labour	3	3,3	1,5

Macroporosité	TravailSol	N	Moyenne	Traduction	Ecart-type
<i>Structure des fentes</i>	Labour	3	2	Lignes	0
	Non labour	3	0	Absence	0
<i>Densité des fentes</i>	Labour	3	1	Très faible	0
	Non labour	3	0	Absence	0
<i>Largeur des fentes (mm)</i>	Labour	3	1		0
	Non labour	3	0		0
<i>Nombre de trous de vers de terre</i>	Labour	3	3,7		0,76
	Non labour	3	4,7		1,04
<i>Nombre de trous non identifiés</i>	Labour	3	3,3		2,89
	Non labour	3	0		0,00

ANNEXE 6 : Photos et résultats de Rouffach



Maïs, labour



Maïs, non labour

Couverture végétale	TravailSol	N	Moyenne	Ecart-type
<i>Hauteur de la culture (cm)</i>	Labour	3	14,2	1,0
	Non labour	3	11	1,0
<i>Couverture de la culture (%)</i>	Labour	3	4,2	1,4
	Non labour	3	3,5	0,9
<i>Présence de résidus scellés (oui/non)</i>	Labour	3	1	0
	Non labour	3	1	0
<i>Couverture des résidus (%)</i>	Labour	3	0,7	0,6
	Non labour	3	2,3	0,3
<i>Couverture des adventices (%)</i>	Labour	3	0,3	0,6
	Non labour	3	0,3	0,6

Battance	TravailSol	N	Moyenne	Ecart-type
<i>Couverture en croûtes structurales (%)</i>	Labour	3	78	1,7
	Non labour	3	74	1,2
<i>Couverture en croûtes sédimentaires (%)</i>	Labour	3	0	0
	Non labour	3	0	0
<i>Facies</i>	Labour	3	F12	0,6
	Non labour	3	F12	0,6
<i>Echelle Boekel</i>	Labour	3	5,2	0,3
	Non labour	3	6	0

Rugosité	TravailSol	N	Moyenne	Ecart-type
Couverture des mottes > 2cm (%)	Labour	3	3,2	2
	Non labour	3	5	3,5
Présence mottes scellées (oui/non)	Labour	3	Oui	0
	Non labour	3	Oui	0
Rugosité visuelle	Labour	3	R1 R2	0
	Non labour	3	R1 R2	1
Rugosité minimale pour l'eau (cm)	Labour	3	0,5	0
	Non labour	3	0,7	0,3
Rugosité maximale pour l'eau (cm)	Labour	3	1,2	1,2
	Non labour	3	1	0,5

Macroporosité	TravailSol	N	Moyenne	Traduction	Ecart-type
<i>Structure des fentes</i>	Labour	3	2,5	Polygones discontinus	0
	Non labour	3	2,7	Polygones discontinus à continus	0,6
<i>Densité des fentes</i>	Labour	3	3,7	Moyenne à forte	0,6
	Non labour	3	3,3	Moyenne (à forte)	0,6
<i>Largeur des fentes</i>	Labour	3	1,3		0
	Non labour	3	1,5		0,5
<i>Nombre de trous de vers de terre</i>	Labour	3	0,3		0,6
	Non labour	3	3,8		0,8
<i>Nombre de trous non identifiés</i>	Labour	3	2,0		2,6
	Non labour	3	0		0



Blé, non labour

Couverture végétale	Culture	N	Moyenne	Ecart-type
Couverture de la culture (%)	Maïs	3	3,5	0,9
	Blé	3	80,0	18,0
Hauteur de la culture (cm)	Maïs	3	11,0	1,0
	Blé	3	54,3	1,5
Couverture des résidus (%)	Maïs	3	2,3	0,3
	Blé	3	2,3	0,6
Présence de résidus scellés (oui/non)	Maïs	3	Oui	0
	Blé	3	Oui	0
Couverture des adventices (%)	Maïs	3	0,3	0,6
	Blé	3	0,3	0,6

Battance	Culture	N	Moyenne	Ecart-type
<i>Couverture en sol nu (%)</i>	Maïs		93,8	
	Blé		17,3	
<i>Couverture en croûtes structurales (%)</i>	Maïs	3	74,3	1,2
	Blé	3	5,3	4
<i>Couverture en croûtes sédimentaires (%)</i>	Maïs	3	0	0
	Blé	3	10,7	9
<i>Pourcentage de la surface nue dégradée</i>	Maïs		79,2	
	Blé		92,3	
<i>Facies</i>	Maïs	3	F12	0,6
	Blé	3	F12	0
<i>Echelle Boekel</i>	Maïs	3	6	0
	Blé	3	4	0

Rugosité	Culture	N	Moyenne	Ecart-type
<i>Couverture de mottes > 2cm (%)</i>	Maïs	3	5	3,5
	Blé	3	0	0
<i>Présence de mottes scellées (oui/non)</i>	Maïs	3	Oui	0
	Blé	3	Non	0
<i>Rugosité visuelle</i>	Maïs	3	R1 R2	1
	Blé	3	R0	0
<i>Rugosité pour l'eau minimale (cm)</i>	Maïs	3	0,7	0,3
	Blé	3	0,5	0
<i>Rugosité pour l'eau maximale (cm)</i>	Maïs	3	1	0,5
	Blé	3	0,5	0
<i>Couverture des cailloux (%)</i>	Maïs	3	3	1,7
	Blé	3	1	0

Macroporosité	Culture	N	Moyenne codée	Moyenne non codée	Signification
<i>Structure des fentes</i>	Blé	3	2,8	Lignes, polygones discontinus	
	Maïs	3	2,7		0,69
<i>Densité des fentes</i>	Blé	3	4	Forte	
	Maïs	3	3,3	Moyenne (à forte)	0,18
<i>Largeur des fentes (mm)</i>	Blé	3	6		
	Maïs	3	1,5		0,00

ANNEXE 7 : Photos et résultats de Muntzenheim



Maïs, labour



Maïs, Semis direct

Couverture végétale	TravailSol	N	Moyenne	Ecart-type
Couverture culture (%)	Labour	3	3	0
	Semi direct	6	1,7	0,8
Hauteur (cm)	Labour	3	13,8	1,2
	Semi direct	6	6,7	2,7
Couverture résidus (%)	Labour	3	1	0
	Semi direct	6	7,8	9,8
Résidus scellés (oui/non)	Labour	3	1	0
	Semi direct	6	0,5	0,5
Couverture adventices (%)	Labour	3	1	0
	Semi direct	6	1	1,6
Couverture couvert végétal (%)	Labour	3	0	0
	Semi direct	6	65	5

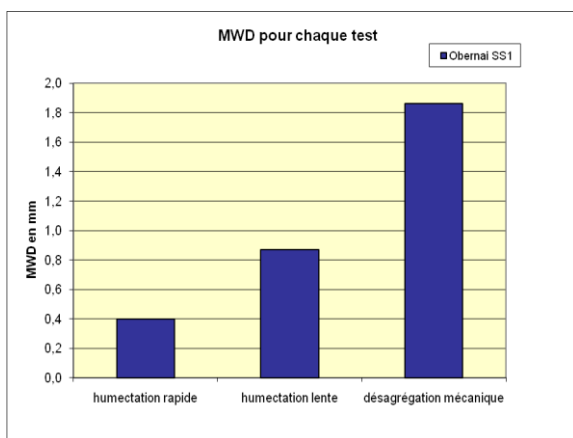
Battance	TravailSol	N	Moyenne	Ecart-type
Couverture croûte structurale (%)	Labour	3	35	0
	Semi direct	6	13	5,0
Couverture croûte sédimentaire (%)	Labour	3	0	0
	Semi direct	6	0	0
Facies	Labour	3	F11	0
	Semi direct	6	F11	0
Echelle boekel	Labour	3	6	0
	Semi direct	6	6	0

Rugosité	TravailSol	N	Moyenne	Ecart-type
<i>Couverture mottes > 2 cm (%)</i>	Labour	3	2,7	1,2
	Semi direct	6	2,0	2,5
<i>Présence de mottes scellées (oui/non)</i>	Labour	3	Oui	0
	Semi direct	6	Oui	0
<i>Rugosité visuelle</i>	Labour	3	R1 R2	1,5
	Semi direct	6	R1	1,2
<i>Rugosité pour l'eau_min</i>	Labour	3	0,5	0
	Semi direct	6	0,7	0,3
<i>Rugosité pour l'eau_max</i>	Labour	3	1,8	0,3
	Semi direct	6	1,6	1

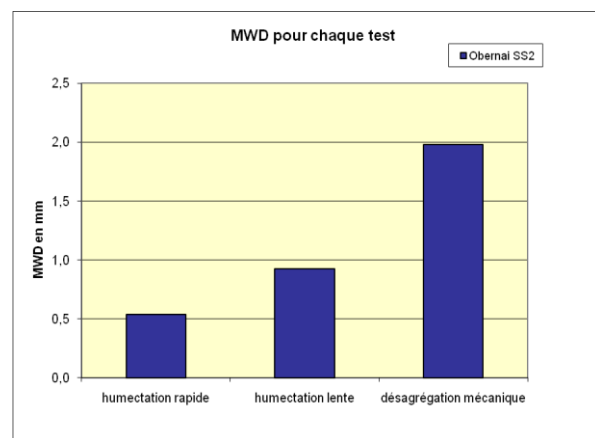
Macroporosité	TravailSol	N	Moyenne	Traduction	Ecart-type
<i>Fente_structure</i>	Labour	3	1	Dispersées	0,0
	Semi direct	6	1,3	Dispersées (quelques lignes)	0,8
<i>Fente_densité</i>	Labour	3	1	Très faible	0,0
	Semi direct	6	1,5	Moyennemet faible	0,8
<i>Fente_largeur (mm)</i>	Labour	3	1,2		0,3
	Semi direct	6	1,1		0,2
<i>Trous de vers de terre</i>	Labour	3	2,5		2,5
	Semi direct	6	3		3,0
<i>Trous autres</i>	Labour	3	0		0,0
	Semi direct	6	1,7		2,6

ANNEXE 8 : Résultats de la stabilité des agrégats

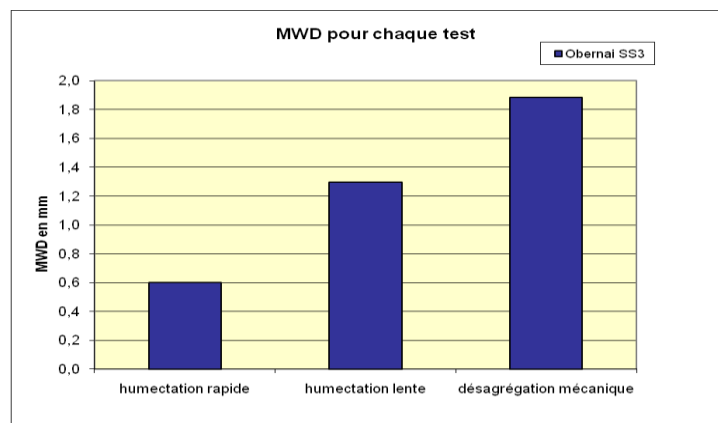
MWD	Stabilité	Battance	Ruissellement et érosion diffuse
< 0,4 mm	Très instable	Systématique	Risque important et permanent en toutes conditions topographiques
0,4 - 0,8 mm	Instable	Très fréquente	Risque fréquent en toutes situations
0,8 - 1,3 mm	Moyennement stable	Fréquente	Risque variable en fonction des paramètres climatiques et topographiques
1,3 - 2,0 mm	Stable	Occasionnelle	Risque limité
> 2,0 mm	Très stable	Très rare	Risque très faible



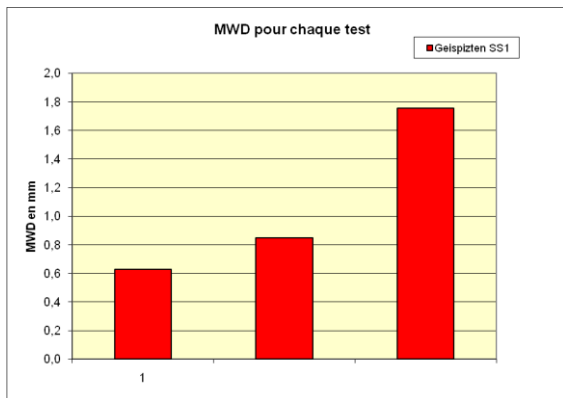
Obernai, blé, labour



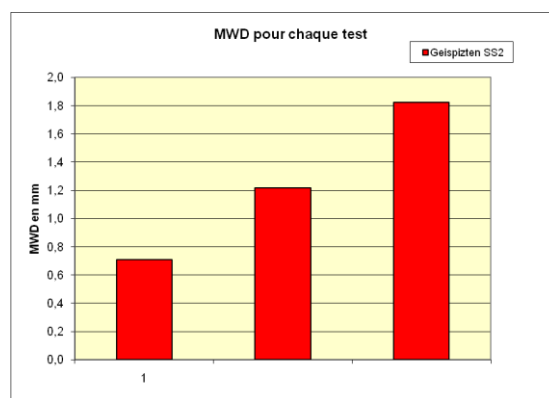
Obernai, blé, non labour



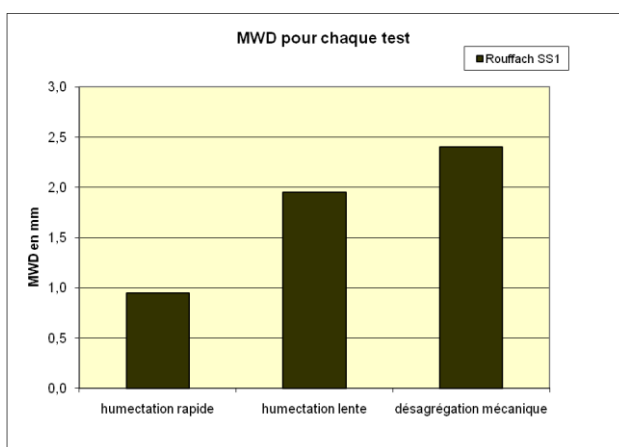
Obernai, blé, semis direct



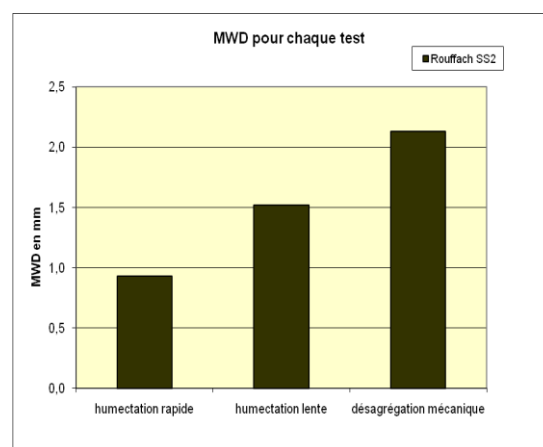
Geispitzen, maïs, labour



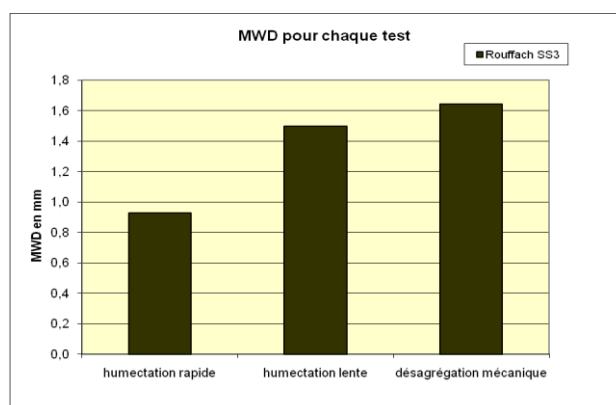
Geispitzen, maïs, non labour



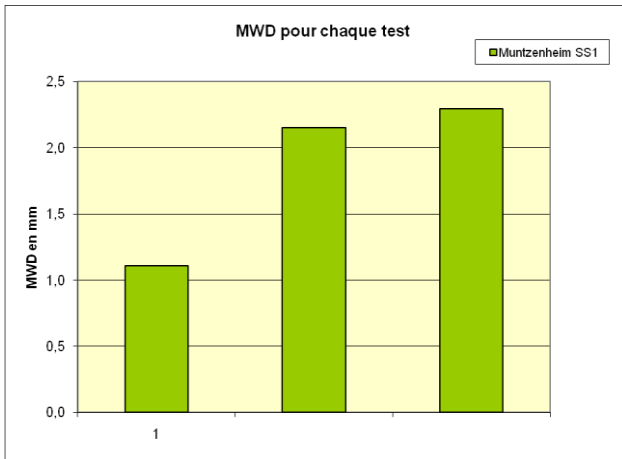
Rouffach, maïs, labour



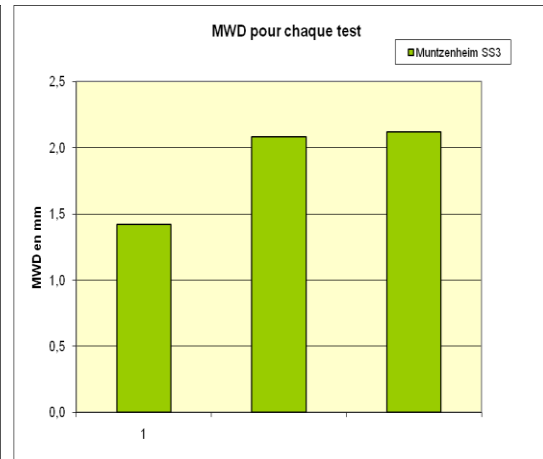
Rouffach, maïs, non labour



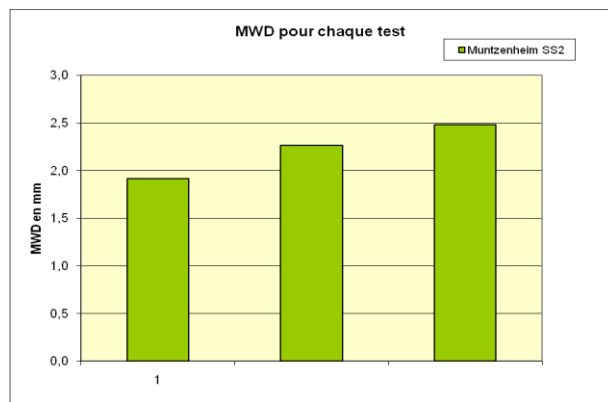
Rouffach, blé, non labour



Muntzenheim, maïs, labour



Muntzenheim, maïs, semis direct



Muntzenheim, orge, labour

ANNEXE 9 : Résultats de la comparaison des différents types de sols

Site/ Couverture végétale	Données	Couverture culture	Hauteur culture	Couverture résidus	Résidus scellés	Couverture adventices
LL (Geispitzen)	Moyenne	1	5,2	1,5	0	0
	N	3	3	3	3	3
	Ecart-type	0	0,8	0,9	0	0
SA (Muntzenheim)	Moyenne	3	13,8	1	1	1
	N	3	3	3	3	3
	Ecart-type	0	1,2	0	0	0
LA (Rouffach)	Moyenne	4,2	14,2	0,7	1	0,3
	N	3	3	3	3	3
	Ecart-type	1,4	1	0,6	0	0,6

Battance

Type de sol (site)	Données	Couverture croûte structurale	Couverture croûte sédimentaire	Facies	Echelle boekel
LL (Geispitzen)	Moyenne	5,3	0	0,7	7
	N	3	3	3	3
	Ecart-type	5	0	0,6	0
SA (Muntzenheim)	Moyenne	35	0	1	6
	N	3	3	3	3
	Ecart-type	0	0	0,0	0
LA (Rouffach) irrigué	Moyenne	78	0	1,7	5,2
	N	3	3	3	3
	Ecart-type	1,7	0	0,6	0,3

Site	Données	Rugosité visuelle	Rugosité pour l'eau_min	Rugosité pour l'eau_max	Couverture mottes>2%
LL (Geispitzen)	Moyenne	3,7	0,5	1,6	6,9
	N	3	3	3	3
	Ecart-type	0,6	0	0,1	1,8
SA (Muntzenheim)	Moyenne	2,7	0,5	1,8	2,7
	N	3	3	3	3
	Ecart-type	1,5	0	0,3	1,2
LA (Rouffach)	Moyenne	3	0,5	1,2	3,2
	N	3	3	3	3
	Ecart-type	0	0	1,2	2

Site	Données	Fente_structure	Fente_densité	Fente_largeur (mm)	Trous de vers de terre	Trous autres
LL (Geispitzen)	Moyenne	2	1	1	3,7	3,3
	N	3	3	3	3	3
	Ecart-type	0	0	0	0,8	2,9
SA (Muntzenheim)	Moyenne	1	1	1,2	2,5	0
	N	3	3	3	3	3
	Ecart-type	0	0	0,3	2,5	0
LA (ROUFFACH), Irrigué	Moyenne	2,5	3,7	1,3	0,3	2
	N	3	3	3	3	3
	Ecart-type	0	0,6	0,0	0,6	2,6